

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Rafael Wickert Bastos

**PROJETO DE UM SILO COM PAREDES DE CONCRETO
PROTENDIDO: CÁLCULO, DIMENSIONAMENTO E
DETALHAMENTO**

Porto Alegre
dezembro 2012

RAFAEL WICKERT BASTOS

**PROJETO DE UM SILO COM PAREDES DE CONCRETO
PROTENDIDO: CÁLCULO, DIMENSIONAMENTO E
DETALHAMENTO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Rubem Clécio Schwingel

Porto Alegre
dezembro 2012

RAFAEL WICKERT BASTOS

**PROJETO DE UM SILO COM PAREDES DE CONCRETO
PROTENDIDO: CÁLCULO, DIMENSIONAMENTO E
DETALHAMENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientado e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 19 de dezembro 2012

Prof. Rubem Clécio Schwingel
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rubem Clécio Schwingel (UFRGS)
Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Ronald Jose Ellwanger (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedico este trabalho a meus pais, Valter e Marisa e aos meus irmãos Rômulo e Paula pela grande satisfação e alegria que encontro ao estar em suas companhias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Rubem Clécio Schwingel, orientador deste trabalho, pelo auxílio tão gratificante, mas principalmente por compartilhar suas experiências, profissionais e pessoais, além de permitir que faça parte do seu dia-a-dia no trabalho, orientando-me sobre os fatos a partir de seu olhar.

Agradeço a Professora Carin Maria Schmitt, pela orientação e dedicação durante todo período em que este trabalho foi realizado.

Agradeço ao Rubem, Paulinho, Marcelo e demais colegas de trabalho Empresa RS Engenharia SC Ltda, pela oportunidade de estágio, o conhecimento transmitido e pela boa companhia, seja no trabalho ou no cafézinho.

Agradeço aos meus pais, Valter e Marisa, por acreditarem em mim, pelo ambiente favorável e suporte necessário para enfrentar os desafios da vida.

Agradeço aos meus irmãos Rômulo e Paula, bem como aos meus pais, por nos respeitarmos, pelo clima harmonioso e por saber que quando for preciso, poderei contar com eles.

Agradeço aos meus amigos, pela parceria de vida, a qual julgo ser essencial.

Posso ter defeitos, viver ansioso e ficar irritado algumas vezes, mas não esqueço de que minha vida é a maior empresa do mundo. E que posso evitar que ela vá à falência.

Ser feliz é reconhecer que vale a pena viver, apesar de todos os desafios, incompreensões e períodos de crise. Ser feliz é deixar de ser vítima dos problemas e se tornar autor da própria história.

É atravessar desertos fora de si, mas ser capaz de encontrar um oásis no recôndito da sua alma.

É agradecer a Deus a cada manhã pelo milagre da vida. Ser feliz é não ter medo dos próprios sentimentos.

Augusto Cury

RESUMO

Com a construção civil apresentando uma boa performance, gerando empregos e contribuindo para diversos gêneros industriais com abrangência bastante significativa por envolver variados segmentos da economia. Tem-se um cenário positivo no ramo da construção civil, logo as indústrias cimenteiras estão ampliando suas fábricas. Parte integrante destas fábricas é o silo de clínquer, que por sua necessidade de armazenamento ser elevada e não suportar umidade, possui dimensões grandes e é construído em concreto protendido. Assim o trabalho consistiu em projetar estruturalmente e detalhar um silo de clínquer com paredes de concreto protendido através das dimensões fornecidas pelo cliente. Para isto foi feita uma pesquisa bibliográfica na qual se fundamentaram os cálculos e o dimensionamento do silo. Os desafios, tais como elaborar um modelo computacional que simulasse a realidade física, os cálculos da protensão e da armadura passiva, apareceram na medida que o trabalho ia progredindo. Inicialmente obteve-se as pressões do material armazenado na parede do silo, calculou-se os efeitos da temperatura e de vento na estrutura. Com os carregamentos concluídos partiu-se para o dimensionamento da armadura horizontal na parede do silo. Feito isto, adicionou-se a força de protensão no modelo estrutural e pode-se realizar o dimensionamento da armadura vertical. Após calculou-se a armadura do bloco de fundação, considerando o mesmo rígido. As etapas de cálculo são descritas no trabalho e a tomada de esforços foi realizado com ajuda de ferramenta computacional, com o programa SAP de elementos finitos. O detalhamento do silo também é apresentado.

Palavras-chave: Silo. Projeto Estrutural. Paredes de Concreto Protendido.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa.....	20
Figura 2 – Silo com parede circular de concreto.....	21
Figura 3 – Definição da altura H relativa à forma do fundo do silo.....	24
Figura 4 – Definições geométricas complementares do silo.....	25
Figura 5 – Casos de descargas geometricamente anormais.....	26
Figura 6 – Componentes vertical e horizontal da carga q.....	30
Figura 7 – Definição das alturas em um silo geometricamente anormal.....	33
Figura 8 – Incidência do vento.....	35
Figura 9 – Seção normal ao eixo do cilindro.....	40
Figura 10 – Pressões horizontais x altura da parede.....	48
Figura 11 – Pressões tangenciais x altura da parede.....	48
Figura 12 – Desenho esquemático do efeito da temperatura.....	49
Figura 13 – Esforços de tração na parede do silo.....	54
Figura 14 – Desenho esquemático da perda por recuo de ancoragem.....	59
Figura 15 – Diagrama de esforços de momento vertical	62
Figura 16 – Esforço de momento M_{yy}	68
Figura 17 – Esforço de momento M_{xx}	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Distribuição das pressões externas em edificações cilíndricas de seção circular.....	36
Quadro 2 – Coeficientes de arrasto (C_a) para cilindros de seção circular.....	37
Quadro 3 – Coeficientes de ponderações das ações (ELU).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores convencionais tabelados de δ para alguns produtos.....	28
Tabela 2 – Valores de	29
Tabela 3 – Pressões horizontais e verticais na parede do silo.....	45
Tabela 4 – Pressões de vento.....	51
Tabela 5 – Força de protensão.....	60
Tabela 6 – Armadura dos nichos de protensão.....	61
Tabela 7 – Armadura vertical.....	64
Tabela 8 – Armadura do bloco de fundação.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS

r_h – raio hidráulico da seção transversal (m)

S – área da seção transversal (m^2)

L – perímetro da seção transversal (m)

H – altura total (m)

h – altura (m)

– ângulo

– altura do plano médio preenchido até base da superfície preenchida (m)

– coordenada relativa

– gravidade específica

– ângulo de atrito interno

δ – ângulo de atrito do material com a parede do silo

– relação entre o ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do material na parede

n – valor nominal da ação horizontal

v – valor nominal da ação vertical

n_o – valor em função da profundidade z

v_o – valor em função da profundidade z

k_n – coeficiente comportamental

k_v – coeficiente devido ao modo de distribuição da pressão

y – definido em função da profundidade reduzida

x – profundidade reduzida

z_0 – altura de referência

T – resultante da carga vertical da parede em faixa unitária do perímetro (N)

h'' – altura para definir y em função da profundidade reduzida (m)

λ – parâmetro para os estados de referencia estacionários

n_2 – valor nominal das ações horizontais

n_1 – valor nominal das ações horizontais, para $z = h$

V_k – velocidade característica do vento (m/s)

V_0 – velocidade básica do vento (m/s)

S_1 – fator de correção para V_k

S_2 – fator de correção para V_k

S_3 – fator de correção para V_k

q – é a pressão dinâmica na estrutura (N/m²)

F_a – é a força de arrasto (N)

C_a – é o coeficiente de arrasto

A_e – é a área frontal efetiva (m²)

Re – número de Reynolds

C_{pe} – coeficiente de pressão externo

M – momento fletor

M_ϕ – momento de flexão

q – resultante radial no cilindro

N – normal a faixa unitária

r – raio do cilindro

T_e – temperatura externa do silo

T_{si} – temperatura máxima da massa de clínquer no interior do silo

e – espessura da parede

– diferença de temperatura entre o lado externo e interno da parede

T_r – temperatura relativa

– coeficiente de dilatação térmica

E – módulo de elasticidade

I – momento de inércia

– tensão de escoamento da cordoalha CP190

– tensão de escoamento do aço CA-50A

– tensão de escoamento no tempo zero

– tensão de escoamento no tempo infinito

A_s – área da armadura passiva

A_p – área da armadura ativa

A_c – área de uma cordoalha

N_{rsd} – resistência característica da armadura passiva

N_d – resistência de projeto

n_p – número de cordoalhas

n_s – número de barras CA-50A por metro

– coeficiente de atrito da protensão

– angulo do arco protendido

– aderência inicial

l_c – comprimento do arco

– perda pro atrito

– recuo de ancoragem

– perda por recuo de ancoragem

N_{p0} – força de protensão

q_0 – força de protensão por metro

– coeficiente da reação

– carregamento vertical que fundação está submetida

– recalque

M_{yy} – momento em relação ao eixo y

M_{xx} – momento em relação ao eixo x

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	18
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA.....	18
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	18
2.2.1 Objetivo Principal.....	18
2.2.2 Objetivo Secundário.....	18
2.3 PRESSUPOSTO.....	18
2.4 DELIMITAÇÕES.....	19
2.5 LIMITAÇÕES.....	19
2.6 DELINEAMENTO.....	19
3 SILOS.....	21
3.1 DEFINIÇÃO.....	21
3.2 ASPECTOS GERAIS.....	22
3.2.1 Geometria.....	23
3.2.2 Tipos de descarga.....	25
4 CARREGAMENTOS ATUANTES.....	27
4.1 CARREGAMENTOS DEVIDO AO MATERIAL ARMAZENADO.....	27
4.1.1 Considerações iniciais.....	27
4.1.2 Pressões horizontais na parede vertical.....	29
4.1.3 Descarga geometricamente anormais.....	33
4.2 CARREGAMENTOS DEVIDO A CARGA PERMANENTE.....	34
4.3 AÇÕES DEVIDO AO VENTO.....	34
5 PROTENSÃO E PAREDES CILÍNDRICAS.....	38
5.1 PROTENSÃO.....	38
5.2 PAREDES CILÍNDRICAS.....	38
6 CÁLCULO DOS CARREGAMENTOS.....	41
6.1 PRESSÕES NA PAREDE DO SILO DEVIDO AO CLÍNQUER.....	41
6.2 EFEITO DA TEMPERATURA.....	49
6.3 CARGA DE VENTO.....	50
6.4 MODELAGEM NO SAP.....	52
7 DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA.....	53
7.1 CÁLCULO DA ARMADURA HORIZONTAL.....	53
7.2 PERDAS DA PROTENSÃO.....	58

7.2.1 PERDA POR ATRITO.....	58
7.2.2 PERDA POR RECUO DE ANCORAGEM.....	58
7.3 FORÇA DE PROTENSÃO.....	60
7.4 ARMADURA DOS NICHOS DE PROTENSÃO.....	60
7.5 ARMADURA VERTICAL.....	61
7.6 BLOCO DE FUNDAÇÃO.....	66
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
REFERÊNCIAS.....	71
APÊNDICE A.....	72
APÊNDICE B.....	82
APÊNDICE C.....	84

1 INTRODUÇÃO

O Brasil migra para um patamar de excelência em pesquisa e tecnologia através de incentivos ao seu potencial técnico e poderio industrial. Este, com a demanda do mercado expandindo, cresce em produção. Isso culmina, entre outros avanços, no fortalecimento e estruturação do mercado da construção civil e, por consequência, na ampliação das indústrias do ramo com novas linhas de produção, expansão das atuais e criação de novas fábricas. Um exemplo, é o ramo das cimenteiras. Segundo Archilla (2010), tem-se aproximadamente setenta fábricas de cimento já instaladas e outras iniciando o processo de construção no País. Essas indústrias já instaladas produzem, aproximadamente 54 milhões de toneladas de cimento por ano, dos quais, cerca de 50% da produção e consumo estão na região Sudeste.

Na década de 1970, a economia do Brasil caracterizou-se pelo período do milagre econômico, ocorrendo um aumento na produção de cimento em aproximadamente quinze milhões de toneladas/ano. Seguiu-se a isso, um período de quinze anos de estagnação. Com o Plano Real houve uma forte retomada na produção e no consumo e nos últimos anos nota-se um avanço considerável dos mesmos, de modo que a projeção para 2015 é de que se produza em torno de 75 a 80 milhões de toneladas de cimento/ano (ARCHILLA, 2010).

Tomando o atual cenário como base, percebe-se que se fará ainda maiores estoques e, portanto, armazenamento de produtos, seja de grãos, produtos sólidos ou pulverulentos. Um exemplo disso é o clínquer, que serve, com a mistura de outros elementos em menor proporção, de matéria-prima para fabricação do cimento Portland. Assim, escolheu-se propor como trabalho de diplomação o projeto estrutural de um silo com paredes de concreto protendido, que fará parte da ampliação de uma cimenteira.

Silos são estruturas com características particulares devido a sua geometria. Assim, as considerações e parâmetros de projeto são diferentes daquelas para concreto armado ou protendido de estruturas convencionais previstas nas normas brasileiras. Portanto, recorre-se a normas estrangeiras para algumas especificações e considerações de projeto, uma vez que não há no Brasil uma norma específica para silos.

Ações específicas devem ser abordadas para o projeto de um silo. As pressões horizontais e verticais que agem sobre as paredes do mesmo, provenientes do material armazenado, bem como as forças devidas ao vento. Em paralelo, tem-se os efeitos da temperatura nas paredes, causados pela diferença da temperatura ambiente e a do material armazenado. Os efeitos devidos ao carregamento e a descarga também devem ser considerados, bem como a força de atrito entre o material armazenado e a parede do silo.

Na ausência de referências bibliográficas nacionais específicas para o cálculo, um dos objetivos deste trabalho de pesquisa é elaborar um roteiro prático, juntamente com o uso de ferramenta computacional, que auxilia na modelagem para o cálculo dos esforços e posterior dimensionamento de um silo com paredes de concreto protendido, podendo ele ser usado como base para projetos futuros.

Com o objetivo de apresentar de forma clara e objetiva o estudo realizado, o trabalho foi dividido em 7 capítulos. No primeiro capítulo abordou-se acerca das considerações iniciais, trazendo aspectos gerais do tema abordado, e ressaltando sua importância. No capítulo 2 foi desenvolvido as diretrizes da pesquisa, composto pela questão de pesquisa, objetivos da pesquisa, pressuposto, delimitações, limitações e pelo delineamento da pesquisa.

O capítulo 3 trata de aspectos gerais relacionados a silos, definindo este tipo de estrutura, sua geometria e os tipos de descarga. O capítulo 4 versa sobre os carregamentos atuantes na estrutura devido ao material armazenado, as pressões causadas pelo material na parede, os carregamentos da carga permanente e as ações devidas ao vento. O capítulo 5 explica a importância da protensão em silos abordando também da teoria da análise estrutural para silos e tanques com paredes cilíndricas.

No capítulo 6 foram descritos os cálculos devidos as cargas na estrutura, tais como pressões horizontais e verticais devido ao clíquer na parede do silo, efeito da temperatura e pressões de vento. Para finalizar, o capítulo 7 trata do dimensionamento da armadura do silo, determina-se a força de protensão e combinações dos carregamentos. A armadura do bloco de fundação também é dimensionado neste capítulo.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: a partir das informações fornecidas pelo cliente, qual uma solução projetual para a estrutura de um silo circular com paredes de concreto protendido?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é o projeto de um silo circular de concreto protendido para armazenamento de clínquer.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) elaboração um roteiro de cálculo para estruturas de silos circulares;
- b) apresentação de um modelo estrutural adequado para análise da estrutura de um silo circular de paredes de concreto protendido.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as normas e a literatura estudadas são adequadas para os cálculos e dimensionamento do projeto do silo de clínquer em questão.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao projeto de um silo circular com paredes de concreto protendido com dimensões pré-determinadas pelo cliente.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações deste trabalho:

- a) utilização de apenas um software para análise estrutural que emprega o método dos elementos finitos: SAP 2000 v.10;
- b) consideração, para o cálculo das pressões nas paredes do silo das instruções do caderno técnico Francês do *L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics* (RÈGLES PROFESSIONNELLES DE CONCEPTION ET DE CALCUL DES SILOS EN BÉTON ARMÉ OU PRÉCONTRAIINT de 1986).

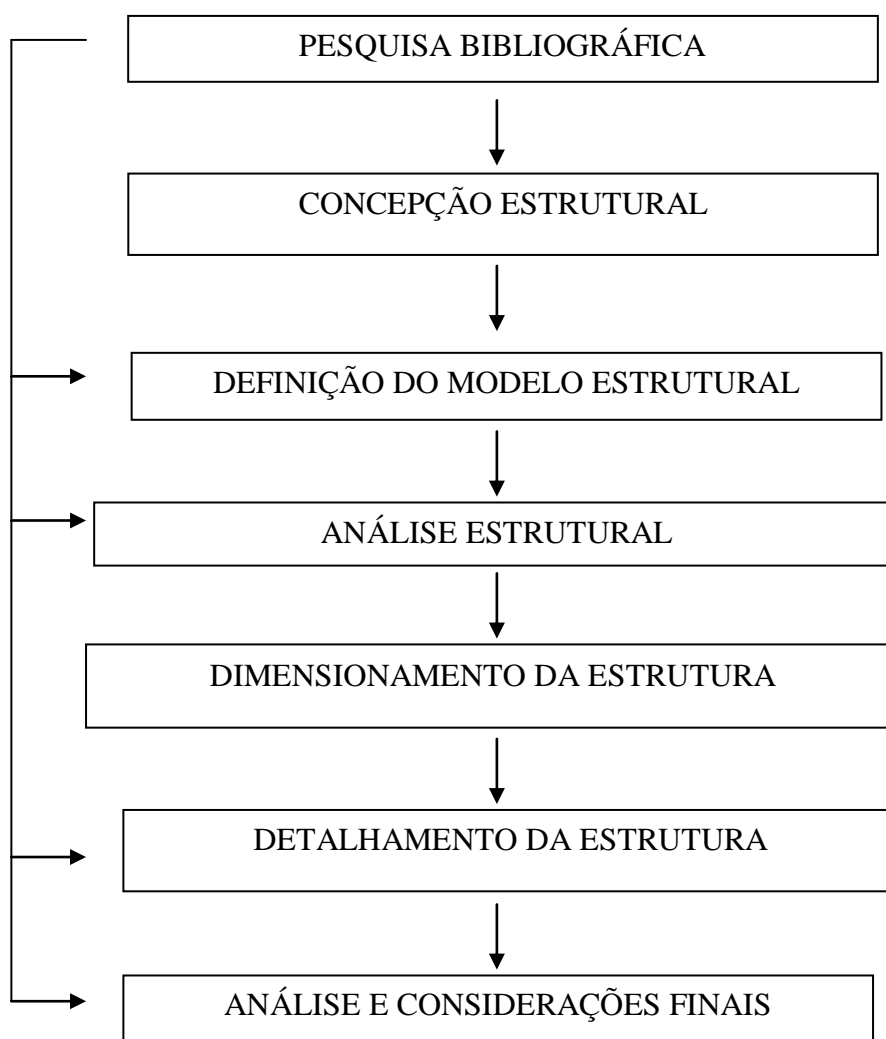
2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) concepção estrutural;
- c) definição do modelo estrutural;
- d) análise estrutural;
- e) dimensionamento da estrutura;
- f) detalhamento da estrutura;
- g) análise e considerações finais.

Como pode-se observar no diagrama a pesquisa bibliográfica apoia quase todas etapas da realização do projeto, logo foi essencial para o trabalho, com maior enfoque na definição do modelo estrutural. A concepção estrutural, a qual depende da criatividade e experiência do engenheiro, foi facilitada devido ao fato do cliente fornecer as dimensões do silo, bem como sua capacidade de armazenamento. Com a concepção estrutural definida pelo contratante da obra, a primeira fase de estudo derivou da definição do modelo estrutural com a determinação dos carregamentos na estrutura: permanentes, variáveis e excepcionais.

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Em seguida realizou-se a análise estrutural do silo em questão com auxílio de ferramenta computacional. A partir desta análise determinou-se as solicitações para cada seção da estrutura, considerando sempre a pior condição de carregamento.

Então, partiu-se para o dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais que formam a estrutura do silo. Com base nas etapas anteriores os resultados foram analisados para a definição das considerações finais do trabalho.

3 SILOS

Neste capítulo são tratados aspectos gerais relacionados aos silos. Define-se este tipo de estruturas, cita-se alguns aspectos gerais para após definir a geometria e os tipos de descargas.

3.1 DEFINIÇÃO

Para definição de silos, contou-se com o auxílio de duas referências, as quais são citadas a seguir. De acordo com Alves (2001, p. 1), “Silos são construções cuja finalidade é armazenar produto sólido, granular ou pulverulento. Podem ser projetados e construídos em diversas formas e tamanhos dependendo do tipo de utilização e do processo para os quais são requeridos.”.

Já o EN 1991-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006, p. 14, tradução nossa), define silos como estruturas utilizadas para o armazenamento de sólidos particulados, isto é, sólidos que se comportam como partículas discretas e independentes. A figura 2 apresenta um silo de seção circular com paredes protendidas.

Figura 2 – Silo com parede circular de concreto protendido



(fonte: L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 1)

3.2 ASPECTOS GERAIS

Para Alves (2001, p. 1):

Os critérios utilizados no projeto estrutural de um silo são similares aos utilizados em outras estruturas. Contudo, suas especificidades geométricas, funcionais e de carregamento apontam para a necessidade de se estabelecer um tratamento particularizado.

Assim, necessita-se conhecimento da distribuição de pressões e de como esta distribuição varia durante o carregamento, armazenagem e descarga. Durante sua vida útil, um silo sofre uma série de ciclos de enchimento, armazenamento e descarga, com conseqüente variação na distribuição de pressões com o tempo.

De acordo com Calil (1990), a pressão nas paredes é função de três conjuntos de parâmetros: as propriedades do produto armazenado, as propriedades geométricas e estruturais do silo e o modo de operação. Com relação às propriedades do produto armazenado devem ser considerados:

- a) peso específico;
- b) ângulo de atrito interno;
- c) ângulo de atrito com a parede;
- d) forma, dimensão e distribuição da partícula;
- e) resistência elástica e cisalhante;
- f) coesão;
- g) consolidação;
- h) umidade;
- i) temperatura.

Com relação às características do silo deve-se considerar:

- a) altura de carga;
- b) seção transversal;
- c) geometria de descarga;
- d) obstruções internas;
- e) rigidez na parede;
- f) rugosidade da parede.

Com relação ao modo de operação características do silo tem-se:

- a) vazão de carga;
- b) vazão de descarga;
- c) tipo de fluxo;
- d) carregamento;
- e) descarga;
- f) excentricidade de carregamento;
- g) excentricidade de descarga.

Itens como geometria e tipos de descargas são descritos a seguir.

3.2.1 Geometria

Neste trabalho é adotada a classificação geométrica apresentada pelo caderno técnico Francês de *L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*, de 1986, que define como parâmetro fundamental para caracterização da seção transversal do silo o raio hidráulico, através da fórmula 1:

$$r_h = \frac{S}{L} \quad \text{(fórmula 1)}$$

Onde:

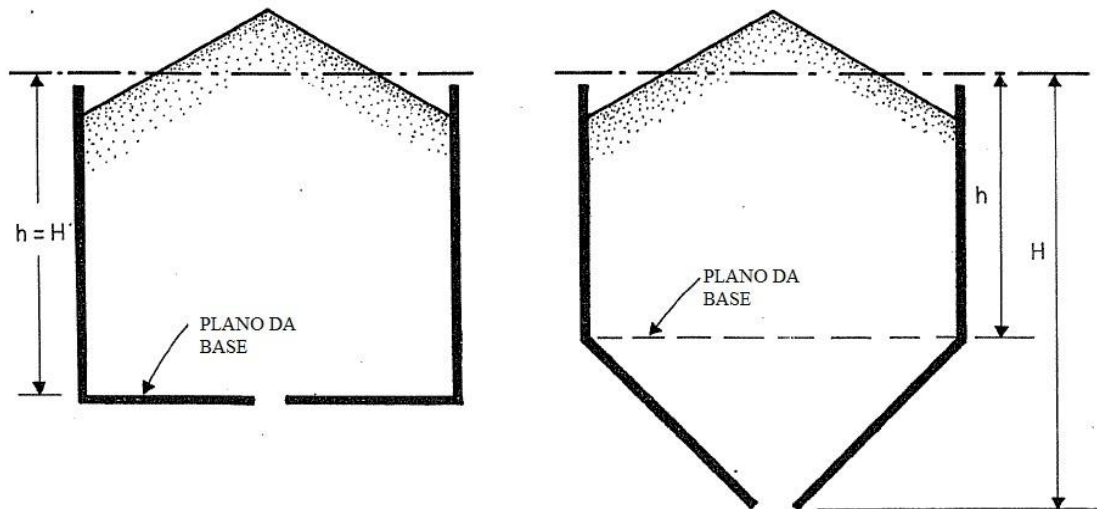
r_h é o raio hidráulico da seção transversal (m);

S é a área da seção transversal (m²);

L é o perímetro da seção transversal (m).

O valor limite do raio hidráulico é igual a $\frac{H}{10}$ ou $\frac{H}{15}$ dependendo do tipo de descarga e, dependendo do tipo de drenagem. A partir do raio hidráulico, define-se a esbeltez do silo com a relação $\frac{H}{r_h}$, com H sendo a altura total, conforme ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Definição da altura H relativa à forma do fundo do silo



(fonte: adaptado de L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 8)

Segundo o *L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics* (1986, p. 8), o valor da esbeltez do silo (H/r_h) deve, obrigatoriamente, ser maior ou igual a 3,5. Recomendando ainda que a altura da parte cilíndrica do silo deve ser pelo menos igual a 0,6 vezes a altura H (figura 4). Portanto, , com h' de com acordo com a fórmula 2:

(fórmula 2)

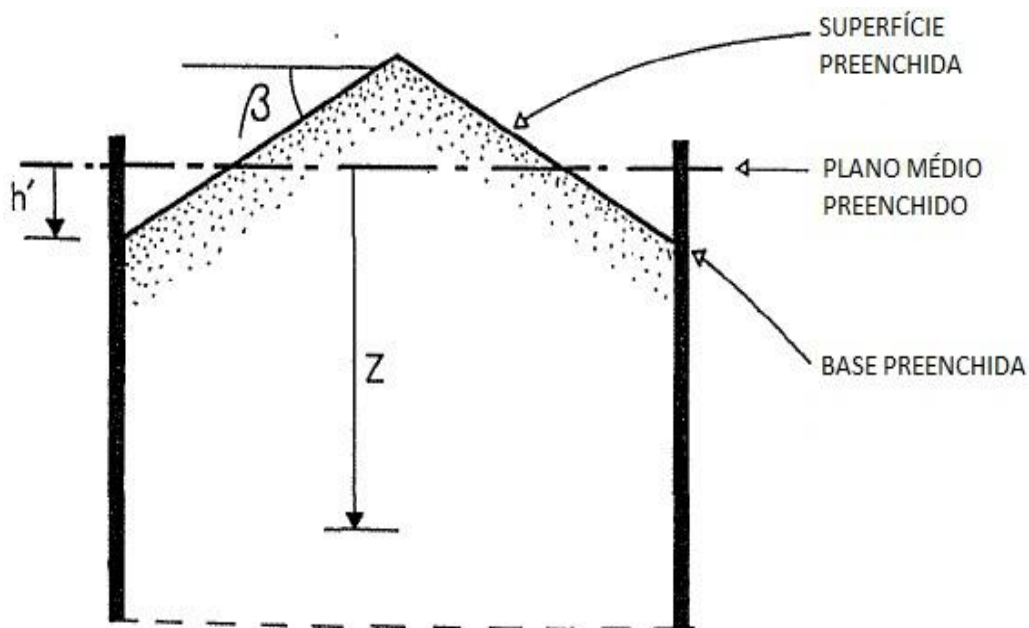
Onde:

r_h é o raio hidráulico da seção transversal;

é o ângulo geratrizes do cone com o plano horizontal, conforme figura 4;

é a altura do plano médio preenchido até base da superfície preenchida.

Figura 4 – Definições geométricas complementares dos silos



(fonte: adaptado de L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 7)

3.2.2 Tipos de descargas

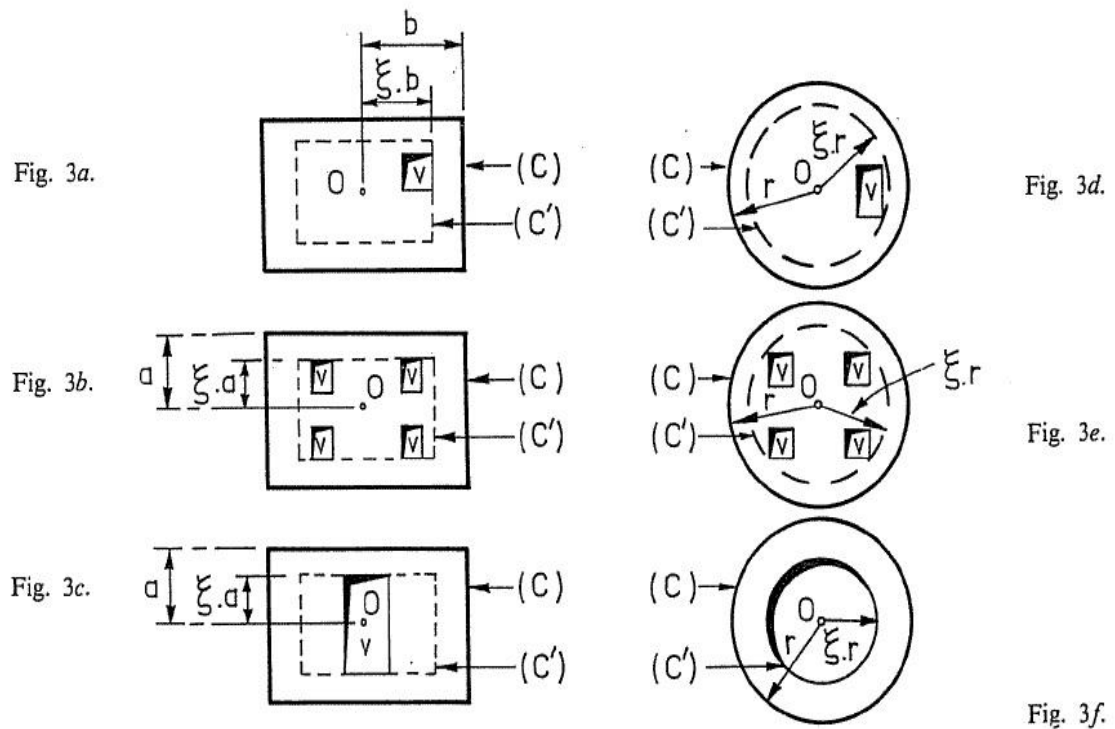
De acordo com o *L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics* (1986, p. 9), o tipo de descarga pode ser normal ou anormal. A descarga de um silo é dita normal quando as três condições forem atendidas:

- o fluxo é dado exclusivamente por gravidade, sem insuflação de ar;
- se existe no interior do silo, sem nenhuma estrutura, a ausência de qualquer tipo de fuga, envolvendo a estrutura interna ou processos de esvaziamento e enchimentos do silo programados;
- o(s) orifício(s) de descarga são localizados na parte inferior. E a coordenada relativa η , do ponto de descarga fora da excentricidade, é inferior ou igual a 0,4.

Se pelo menos uma destas três condições não for satisfeita, a descarga é classificada como anormal.

Já a coordenada relativa η , conforme *L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics* (1986, p. 9), é fornecida considerando a seção de um silo no plano de base. Através da figura 5, pode-se constatar seis casos de silos geometricamente anormais.

Figura 5 – Casos de descargas geometricamente anormais



(fonte: L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 9)

Onde:

(C) o contorno da presente seção transversal;

O como o centro da seção transversal;

(Y) projeção no plano da base de todos os contornos das saídas de descarga do silo considerado.

é chamada a relação homotética, de centro O, que mapeia o contorno (C) e o contorno menor homotético (C'), o qual contém todas as bordas (V). sendo a coordenada relativa do ponto de descarga fora da excentricidade.

4 CARREGAMENTOS ATUANTES

Os principais carregamentos atuantes no projeto de silos são devidos aos materiais armazenados. Porém, devem ser considerados outros carregamentos, não menos importantes, como as cargas permanentes e as pressões devidas às ações do vento (SAFARIAN; HARRIS, 1985, p. 65, tradução nossa). Neste capítulo são discutidos aspectos relevantes desses carregamentos para a correta análise e projeto de um silo.

4.1 CARREGAMENTOS DEVIDO AO MATERIAL ARMAZENADO

Nos itens a seguir, são apresentados o roteiro para se encontrar as pressões devido ao material armazenado no silo. Assim como aspectos que devem ser considerados segundo a publicação do L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS de 1986.

4.1.1 Considerações iniciais

Segundo Scalabrin (2008, p. 47), as pressões devidas ao armazenamento de grãos comportam-se de forma diferente das formadas pelos líquidos (carregamento hidrostático com distribuição linear com a profundidade). Enquanto nos líquidos encontra-se apenas pressão horizontal normal à parede, no armazenamento de grãos surge outra pressão devida ao atrito do material com a parede da estrutura.

Para Madrona (2008, p. 37):

A pressão de atrito é distribuída na superfície interna das paredes e equilibra parte do peso do produto, resultando em esforços de compressão na parede do silo. A presença da pressão de atrito faz com que a pressão horizontal nas paredes não aumente linearmente com a profundidade do silo como as pressões hidrostáticas.

Segundo *L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics* (1986, p. 10), os três valores que caracterizam uma silagem de produto são:

- a) γ : a sua gravidade específica;
- b) α seu ângulo de atrito interno;
- c) δ é o ângulo de atrito do material na parede do silo.

Caso não se tenha ensaios experimentais para os valores de δ , pode ser usados os valores da tabela 1 (L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 11).

Tabela 1 – Valores convencionais de δ para alguns produtos

Produtos	Peso Específico	Peso Específico	Ângulo de Atrito interno	
	kg/m ³	(kN/m ³)		
Industriais	Cimento*	1500	14,7	28°
	Clínquer**	1500 à 1600	14,7 à 15,7	33°
	Cimento cru*	1325	13,0	26°
	Gesso*	1250	12,25	25°
	Pó de carbono*	850	8,35	25°
Agrícolas	Trigo	850	8,35	26°
	Milho	800	7,85	24°
	Cevada	825	8,1	24°
	Colza	715	7,0	24°
	Soja em grãos	765	7,5	27°
	Girassol	510	5,0	22°
	Sorgo	750	7,35	23°
	Arroz descascado	875	8,6	30°
	Farinha de trigo*	900	8,8	20°
	Açúcar granulado	920	9,0	30°

(*) Para cimento, gesso e em pó, em geral, quando a altura h média de produto armazenado acima do plano da base excede 10 m, o peso específico é multiplicar por:

—

(**) A densidade do clínquer pode variar em limites indicados acima. Pertence ao Proprietário especificar o valor a ser considerado nos cálculos, tendo particularmente em conta o peso específico os grãos constituintes e a proporção de multas que podem caber no tamanho de partícula.

(fonte: adaptado de L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 11)

Valores de δ , também podem ser encontrados através da relação entre ϕ e δ , que é dado por $\delta = \phi \cdot \tan(\alpha)$, considerando que os valores obtidos, neste caso, são superiores aos experimentais. Os valores de δ são fornecidos na tabela 2 (L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 11) e dependem do tipo de parede utilizado, sendo as paredes A, B e C sendo respectivamente:

- a) A: parede estriada horizontalmente;
- b) B: concreto não revestido;
- c) C: concreto revestido com tinta.

Tabela 2 – Valores de

TIPO DE PRODUTO	EXEMPLO	PAREDE A	PAREDE B	PAREDE C
Pó	cimento, gesso, farinha	0,87	0,8	-
Pequenos Grãos (exceto casos especiais)	trigo, milho, cevada, sorgo	0,87	0,75	-
	açúcar granulado	0,87	0,75	0,50*
Grossoiro	clinker	0,87	0,7	-
Casos especiais	colza, sementes de soja, girassol, arroz sem casca	0,75	0,65	-

(*) A Comissão tem, na data da publicação destas regras, o teste do açúcar para a parede C

(fonte: adaptado de L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 11)

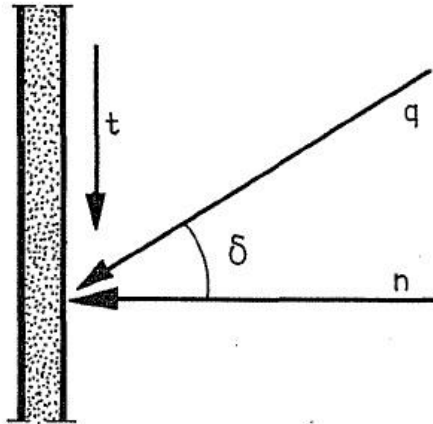
4.1.2 Pressões horizontais na parede vertical

A ação do material ensilado sobre uma parede vertical num dado ponto do mesmo é uma carga q , de inclinação δ em relação à horizontal, e as componentes, horizontal: n (normal à parede) e vertical, representado por t , de acordo com a figura 6. Supõe-se ainda que a carga q e os seus componentes n e t são constantes a uma dada profundidade z (exceto no caso de descarga geometricamente anormal) (L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 12).

Para determinação das ações exercidas sobre as paredes verticais e na parte inferior de um silo com descarga normal, os valores das ações são valores nominais e devem constar nos cálculos

de carga, multiplicados pelos fatores fornecidos (coeficientes de ponderação) pelas normas relativas aos materiais de construção do silo, que para este trabalho, é o concreto protendido (L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 13).

Figura 6 – Componentes vertical e horizontal da carga q



(fonte: L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 9)

O valor nominal de uma ação é descrito como o produto de seu valor de base por um coeficiente de comportamento k (quando se utiliza deste artifício não se exclui o coeficiente de ponderação descrito anteriormente) e como pode-se ver nas fórmulas 3 e 4. Já as fórmulas 5, 6, 7 e 8 são gerais para as ações devido a carga do material (L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 13):

(fórmula 3)

(fórmula 4)

(fórmula 5)

(fórmula 6)

(fórmula 7)

(fórmula 8)

Onde:

n e v são valores nominais das ações verticais e horizontais;

n_o e v_o são valores em função da profundidade z ;

k_n é o coeficiente comportamental que reflete as pressões que poderão aparecer numa extensão determinada da parede do silo e vale 1,15;

k_v é o coeficiente levado em conta a cerca da incerteza sobre o modo de distribuição da pressão na parte inferior e de picos de pressão e vale 1,35. Para o projeto de fundações pode ser tomado igual a 1,00;

γ é o peso específico do material armazenado;

r_h é o raio hidráulico do silo;

δ é o ângulo de atrito do material na parede do silo;

é definido em função de (profundidade reduzida) e ambos são definidos abaixo;

z_o é a altura de referência, definida a seguir;

T é a resultante da carga vertical da parede em faixa unitária do perímetro, para toda altura do silo.

L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics (1986, p. 13) ressalta que para definir y em função da profundidade reduzida x , é necessário definir z_1 que é uma altura igual a: $z_1 = \lambda_1 z_o$. Além do parâmetro λ , para os estados de referência estacionários, 1 e 2 respectivamente e da altura de referência z_1 e z_2 referenciados nas fórmulas que seguem. Deve-se ressaltar que o λ_1 , tem um valor mais baixo do que o calculado pelo segundo estado (λ_2):

(fórmula 9)

(fórmula 10)

(fórmula 11)

(fórmula 12)

(fórmula 13)

(fórmula 14)

Onde:

λ parâmetro para os estados de equilíbrio;

r_h é o raio hidráulico do silo;

δ é o ângulo de atrito do material na parede do silo;

seu ângulo de atrito interno;

é a profundidade reduzida.

Supõe-se que a ação n_3 se aplica uniformemente nas paredes do silo, sendo n_3 maior do que n_2 (L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 16).

4.2 CARREGAMENTOS DEVIDO A CARGA PERMANENTE

As cargas permanentes tais como a carga devido às paredes de concreto protendido, carga da instrumentação mecânica, carga de cobertura e revestimentos, por exemplo, estão presentes em toda vida útil da estrutura por isto devem ser consideradas em todas combinações utilizadas para o dimensionamento da estrutura.

4.3 AÇÕES DEVIDAS AO VENTO

As estruturas dos silos são calculadas principalmente para resistirem aos carregamentos das pressões dos materiais armazenados. A ação variável do vento deve ser considerada, dando maior importância a análise de estabilidade local e global da estrutura quando esta se encontra vazia, já que quando carregada, possui elevada massa e dificilmente sofre danos pela ação do vento (ANDRADE JUNIOR, 2002, p. 141).

Para determinação destes carregamentos são utilizadas as considerações previstas na NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), norma que trata dos fatores a serem levados em conta na determinação das pressões devidas às ações do vento. A partir da velocidade característica do vento determina-se a pressão dinâmica na estrutura e após a força de arrasto na atuante na estrutura, segundo as fórmulas 17 a 19 respectivamente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4):

(fórmula 17)

(fórmula 18)

(fórmula 19)

Onde:

V_k é a velocidade característica do vento (m/s);

V_o é a velocidade básica do vento, determinada pela velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida uma vez em 50 anos, a 10m acima do terreno, em campo aberto e plano (m/s);

S_1 é o fator que considera as variações de relevo do terreno;

S_2 é o fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação em análise;

S_3 é o fator que considera o grau de segurança e vida útil requeridos para a estrutura (valor normativo para silos é igual a 0,95);

q é a pressão dinâmica na estrutura (N/m²);

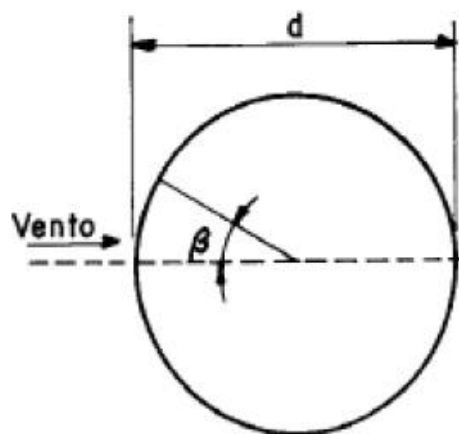
F_a é a força de arrasto (N);

C_a é o coeficiente de arrasto;

A_e é a área frontal efetiva (m²).

A determinação do perfil de pressões externas no contorno da estrutura deve ser feita tomando por base a posição de incidência do vento conforme a figura 8, para o caso de um silo circular.

Figura 8 – Incidência do vento



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19)

Os coeficientes de pressão externos C_{pe} de edificações cilíndricas de seção circular são apresentados no quadro 1, de acordo com a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE

NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19). O uso deste quadro está limitado às situações em que $Re > 420000$, sendo $Re = 70000V_k D$. Re é o número de Reynolds, que é adimensional e utilizado para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido.


Para determinação da força de arrasto em uma estrutura, citada acima, deve-se obter o coeficiente de arrasto (C_a) que depende, dentre outras coisas, da forma da seção transversal desta. O quadro 2 apresenta os valores de coeficiente de arrasto para cilindros de seção circular previstos pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988).

Quadro 1– Distribuição das pressões externas em edificações cilíndricas de seção circular

	Coeficiente de pressão externa C_{pa}			
	Superfície rugosa ou com saliências		Superfície lisa	
	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
	+0,9	+0,9	+0,9	+0,9
	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7
	+0,4	+0,4	+0,35	+0,35
	0	0	0	0
	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5
	-0,95	-0,8	-1,2	-1,05
	-1,25	-1,1	-1,4	-1,25
	-1,2	-1,05	-1,45	-1,3
	-1,0	-0,85	-1,4	-1,2
	-0,8	-0,65	-1,1	-0,85
	-0,5	-0,35	-0,6	-0,4
	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19)

Quadro 2 – Coeficientes de arrasto (C_a) para cilindros de seção circular

Planta	Re x 10 ⁻³	h/l ₁							
		1/2	1	2	5	10	20	∞	
	liso (metal, concreto, alvenaria rebocada)	≤ 3,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
		≥ 4,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
	com rugosidade ou saliências = 0,02 l ₁	Todos valores	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2
	com rugosidade ou saliências = 0,08 l ₁	Todos valores	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 22)

5 PROTENSÃO E PAREDES CILÍNDRICAS

Este capítulo além de abordar a importância da protensão em silos, trata da teoria da análise estrutural para silos e tanques com paredes cilíndricas.

5.1 PROTENSÃO

No caso de silos com paredes de concreto protendido, para armazenamento de clínquer, o maior benefício da protensão é no sentido de diminuir as fissuras do concreto, causadas normalmente por esforços de tração, uma vez que o material armazenado não pode ter contato com a umidade. Leonhardt (1983, p. 7) cita as vantagens peculiares do concreto protendido:

A protensão melhora a capacidade de utilização, impedindo que as fissuras se desenvolvam no concreto ou, pelo menos, fazendo com que as aberturas de fissuras possam ser limitadas com segurança a um valor não prejudicial. Isto aumenta a durabilidade.

As estruturas de concreto protendido podem suportar consideráveis excessos de carga sem danos remanescentes. As fissuras que surgem por ocasião do excesso de carga voltam a se fechar por completo, desde que as tensões no aço permaneçam abaixo do limite de alongamento de 0,01%.

Leonhardt (1983, p. 233) sugere, ainda, em relação às exigências relativas à abertura de fissuras, que:

As exigências relativas à abertura admissível de fissuras (w_m ou w_{90}) devem ser previstas em função da utilização prevista e da vida útil da estrutura. A inexistência de fissuras somente é exigida para reservatórios de fluídos ou gases, caso em que é suficiente impedir o surgimento de fissuras de separação, desde que as fissuras de flexão não destruam a estanqueidade do reservatório [...]. Fissuras que possam ser visíveis a olho nu devem ser evitadas em qualquer tipo de obra.

5.2 PAREDES CILÍNDRICAS

Segundo Ghali (1979, p. 3, tradução nossa):

Paredes cilíndricas de tanques circulares ou silos são geralmente submetidas a pressões radiais do material contido ou do material externo (terra, por exemplo). Esta pressão é assumida por ter uma intensidade, a qual é constante em qualquer nível, mas varia na direção vertical. Outras fontes de carregamentos assimétricos sobre as paredes são por tensão circunferencial, peso de plataformas circulares ou canais periféricos.

Este tipo de carregamento produz deslocamento radial assimétrico. A borda da parede no topo ou fundo pode ser livre pra rotação ou translação e pode ser restringida pela base ou pela cobertura. Assim a borda pode receber cisalhamento radial ou momento de flexão. Tais forças finais desenvolverão uma restrição na borda devido aos efeitos de variação de temperatura, retração ou deformação do concreto.

Para a análise de uma parede deste tipo é suficiente considerar as forças e as deformações de uma faixa de elemento paralelo ao eixo do cilindro. O deslocamento radial da faixa deve ser acompanhado pelas forças angulares. [...] A faixa se comporta como uma viga sobre fundação elástica a qual recebe força de reação transversal proporcional a todos os pontos de deflexão na viga. A análise resulta numa equação diferencial que relata a deflexão para a carga aplicada.

As seções transversais de tanques formados por intersecções de cascas de revolução, quando sujeitos a carregamentos axiais, podem ser analisadas pelos deslocamentos gerais ou análise do método das forças. Ghali (1979, p. 5, tradução nossa) ressalta que:

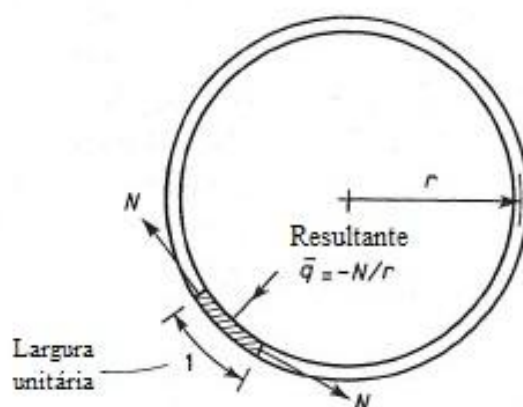
Para isto, considera-se uma faixa obtida pelo corte da casca por dois planos radiais verticais com um pequeno ângulo arbitrário entre eles. Esta faixa é então tratada como um conjunto de elementos para os quais os coeficientes de rigidez no método de deslocamentos ou os coeficientes de flexibilidade no método das forças precisam ser calculados.

Para Ghali (1979, p. 15), no caso da análise de cascas circulares ou cilíndricas submetidas a carregamentos assimétricos, é suficiente considerar uma faixa do elemento paralelo ao eixo do cilindro. Tal elemento flexiona como uma viga na fundação elástica e a equação diferencial que reproduz a flexão oriunda da carga.

Segundo Ghali (1979, p. 17, tradução nossa) e como pode ser visualizado na figura 9:

Considerando uma faixa de largura unitária ao longo da geratriz do cilindro. A tensão no anel sobre os dois lados da faixa tem uma resultante radial. Quando a faixa é submetida a um momento de flexão positivo M , tensões de tração e compressão são produzidas paralelas a geratriz sobre as faces, exterior e interior, respectivamente. Devido ao efeito de Poisson, as duas bordas da faixa tendem a girar para fora de seu plano radial original. Por causa da simetria, esta rotação não pode ocorrer, bem como os lados de qualquer faixa devem permanecer em planos radiais. Assim como a flexão das faixas o alongamento lateral é impedido. A influência de restrição é impedida pelo momento de flexão M_θ na direção circunferencial.

Figura 9 – Seção normal ao eixo do cilindro



(fonte: adaptado de GHALI, 1979, p. 16)

Ghali (1979, p. 21) propõe a criação de tabelas para projeto, considerando que todo carregamento tenha variação similar de flexão radial, momento fletor e cortante, sendo estas quantidades expressas como o produto de um coeficiente dependo de α , por exemplo, e um multiplicador adequado. Essas tabelas em questão serviriam apenas para paredes de espessura constante, de modo que, para paredes de espessura variável a metodologia é diferente.

6 CÁLCULO DOS CARREGAMENTOS

Este capítulo fornece os cálculos para as pressões horizontais e tangenciais na parede do silo devido ao clínquer, os parâmetros e os efeitos da temperatura no silo, bem como as cargas devido ao vento e o momento causado na fundação. Com os cálculos do material armazenado e o vento foram elaboradas tabelas com as pressões no silo variando com a altura.

6.1 PRESSÕES NA PAREDE DO SILO DEVIDO AO CLÍNQUER

Para análise do domínio do silo são utilizados os dados geométricos fornecidos pelo cliente, tais como a altura (H) do silo e seu diâmetro (D).

Onde:

H= 33,5 m;

D= 25,0 m.

Após calcula-se a esbeltez do silo, com auxílio da fórmula 1:

$$\lambda = \frac{H}{D}$$

Quanto a descarga, o silo pode ser classificado como geometricamente anormal, pois .
As características do material são descritas abaixo.

Onde:

peso específico do clínquer:

ângulo de atrito interno:

Como a parede do silo é de concreto não revestido, o ângulo da parede com o material se dá pela fórmula:

Os cálculos para as pressões na parede são apresentados, com α e β conforme 4.1.2 e x e y através das fórmulas 13 e 14, respectivamente, do mesmo capítulo.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{1 - \mu \tan^2 \phi}{\mu}\right)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{1 + \mu \tan^2 \phi}{\mu}\right)$$

Assim, para silo com descarga normal, tem-se, a partir da fórmula 5:

$$p = \frac{\gamma r^2}{2} \left(\frac{1 - \mu \tan^2 \phi}{\mu} \right)$$

Para descarga geometricamente anormal tem-se:

$$p = \frac{\gamma r^2}{2} \left(\frac{1 - \mu \tan^2 \phi}{\mu} \right)$$

Onde:

9,60 é o maior afastamento da aresta de abertura em relação ao centro do silo;

12,50 é o raio do silo.

Como σ_{θ} , com a fórmula 16, em 4.1.3 tem-se:

$$\sigma_{\theta} = \frac{p}{t} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{p}{t} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2$$

O momento de ovalização devido à descarga geometricamente anormal é considerado junto com σ_{θ} e não o pior dos dois, sendo calculado por :

$$\sigma_{\theta} = \frac{p}{t} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2$$

Onde:

;

;

pode ser tomado como $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{2}{3}$, para o caso de silo em concreto de primeira, segunda e terceira categoria respectivamente;

$$\sigma_{\theta} = \frac{p}{t} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2$$

;

, que é o módulo de elasticidade do concreto.

$r = 12,5$ m, como raio do silo;

h_0 é a espessura da parede, igual a 0,40 m.

Logo, para o momento de ovalização obtém-se o valor abaixo, com _____

.

Para a pressão tangencial junto à parede vertical é utilizada a fórmula:

. Já a pressão vertical média no plano da base do silo é dada pela fórmula 7:

Onde:

$$\frac{\dots}{\dots} ; \frac{\dots}{\dots}$$

$$\frac{\dots}{\dots} \frac{\dots}{\dots}$$

$$\frac{\dots}{\dots} \frac{\dots}{\dots}$$

A resultante da carga vertical da parede em faixa unitária do perímetro, para toda altura do silo é descrita a seguir (fórmula 8), com a profundidade reduzida dada pela fórmula 13:

Verificação do equilíbrio das forças verticais, considerando carga total = peso de clínquer – carga da parede – carga de fundo.

Onde:

;

;

Assim a , satisfazendo o equilíbrio.

Com os resultados obtidos acima elaborou-se a tabela 3 com as pressões na parede do silo variando com a altura.

Tabela 3 – Pressões horizontais e verticais na parede do silo

h (m)	z (m)	n2 (tf/m ²)	Δn (tf/m ²)	Pressão horizontal	M _{ovalização} (tfm/m)	Pressão tangencial
				n3 (tf/m ²)		t (tf/m ²)
33,50	0,00	-3,01	0,37	-2,64	5,11	-1,55
33,00	0,50	-2,15	0,39	-1,77	5,06	-1,04
32,50	1,00	-1,32	0,40	-0,92	5,02	-0,54
32,00	1,50	-0,52	0,41	-0,11	4,99	-0,06
31,50	2,00	0,25	0,43	0,68	4,97	0,40
31,00	2,50	1,00	0,44	1,44	4,95	0,85
30,50	3,00	1,72	0,46	2,18	4,95	1,28
30,00	3,50	2,42	0,47	2,89	4,94	1,70
29,50	4,00	3,09	0,48	3,58	4,95	2,10
29,00	4,50	3,74	0,50	4,24	4,96	2,49
28,50	5,00	4,37	0,51	4,88	4,97	2,87
28,00	5,50	4,98	0,53	5,50	4,98	3,23
27,50	6,00	5,56	0,54	6,10	5,00	3,58

continua

continuação

h (m)	z (m)	n2 (tf/m ²)	Δn (tf/m ²)	Pressão horizontal	M _o valização (tfm/m)	Pressão tangencial
				n3 (tf/m ²)		t (tf/m ²)
27,00	6,50	6,13	0,55	6,68	5,02	3,92
26,50	7,00	6,67	0,57	7,24	5,05	4,25
26,00	7,50	7,20	0,58	7,78	5,08	4,57
25,50	8,00	7,71	0,60	8,30	5,10	4,88
24,50	9,00	8,67	0,62	9,30	5,17	5,46
24,00	9,50	9,13	0,64	9,77	5,20	5,74
23,50	10,00	9,58	0,65	10,23	5,24	6,01
23,00	10,50	10,00	0,67	10,67	5,28	6,27
22,50	11,00	10,42	0,68	11,10	5,32	6,52
22,00	11,50	10,81	0,69	11,51	5,36	6,76
21,50	12,00	11,20	0,71	11,91	5,40	6,99
21,00	12,50	11,57	0,72	12,29	5,44	7,22
20,50	13,00	11,93	0,74	12,67	5,49	7,44
20,00	13,50	12,28	0,75	13,03	5,53	7,65
19,50	14,00	12,61	0,76	13,38	5,58	7,86
19,00	14,50	12,93	0,78	13,71	5,63	8,05
18,50	15,00	13,25	0,79	14,04	5,68	8,25
18,00	15,50	13,55	0,81	14,35	5,73	8,43
17,50	16,00	13,84	0,82	14,66	5,78	8,61
17,00	16,50	14,12	0,83	14,95	5,83	8,78
16,50	17,00	14,39	0,85	15,24	5,88	8,95
16,00	17,50	14,65	0,86	15,52	5,93	9,11
15,50	18,00	14,91	0,88	15,78	5,99	9,27
15,00	18,50	15,15	0,89	16,04	6,04	9,42
14,50	19,00	15,39	0,90	16,29	6,09	9,57

continua

continuação

h (m)	z (m)	n2 (tf/m ²)	Δn (tf/m ²)	Pressão horizontal	$M_{\text{ovalização}}$	Pressão tangencial
				n3 (tf/m ²)	(tfm/m)	t (tf/m ²)
14,00	19,50	15,62	0,92	16,53	6,15	9,71
13,50	20,00	15,84	0,93	16,77	6,21	9,85
13,00	20,50	16,05	0,95	16,99	6,26	9,98
12,50	21,00	16,25	0,96	17,21	6,32	10,11
12,00	21,50	16,45	0,97	17,42	6,38	10,23
11,50	22,00	16,64	0,99	17,63	6,44	10,36
11,00	22,50	16,83	1,00	17,83	6,50	10,47
10,50	23,00	17,01	1,01	18,02	6,56	10,59
10,00	23,50	17,18	1,03	18,21	6,62	10,69
9,50	24,00	17,35	1,04	18,39	6,68	10,80
9,00	24,50	17,51	1,06	18,56	6,74	10,90
8,50	25,00	17,66	1,07	18,73	6,80	11,00
8,00	25,50	17,81	1,08	18,90	6,86	11,10
7,50	26,00	17,96	1,10	19,05	6,92	11,19
7,00	26,50	18,10	1,11	19,21	6,99	11,28
6,50	27,00	18,23	1,13	19,36	7,05	11,37
6,00	27,50	18,36	1,14	19,50	7,11	11,45
5,50	28,00	18,49	1,15	19,64	7,18	11,54
5,00	28,50	18,61	1,17	19,78	7,24	11,62
4,50	29,00	18,73	1,18	19,91	7,31	11,69
4,00	29,50	18,84	1,20	20,03	7,37	11,77
3,50	30,00	18,95	1,21	20,16	7,44	11,84
3,00	30,50	19,05	1,22	20,28	7,50	11,91
2,50	31,00	19,16	1,24	20,39	7,57	11,98
2,00	31,50	19,25	1,25	20,51	7,63	12,04

continua

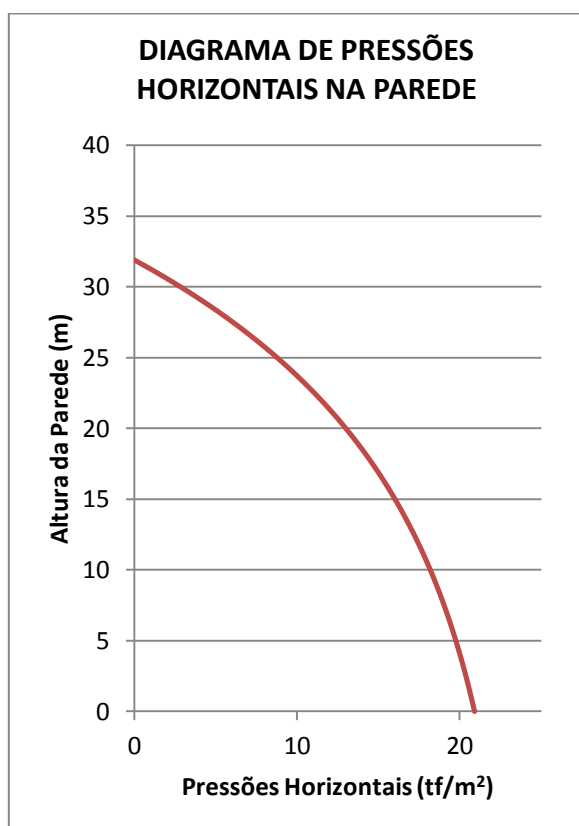
continuação

h (m)	z (m)	n2 (tf/m ²)	Δn (tf/m ²)	Pressão horizontal	$M_{\text{ovalização}}$	Pressão tangencial
				n3 (tf/m ²)	(tfm/m)	t (tf/m ²)
1,50	32,00	19,35	1,27	20,62	7,70	12,11
1,00	32,50	19,44	1,28	20,72	7,77	12,17
0,50	33,00	19,53	1,29	20,82	7,84	12,23
0,00	33,50	19,62	1,31	20,92	7,90	12,29

(fonte: elaborado pelo autor)

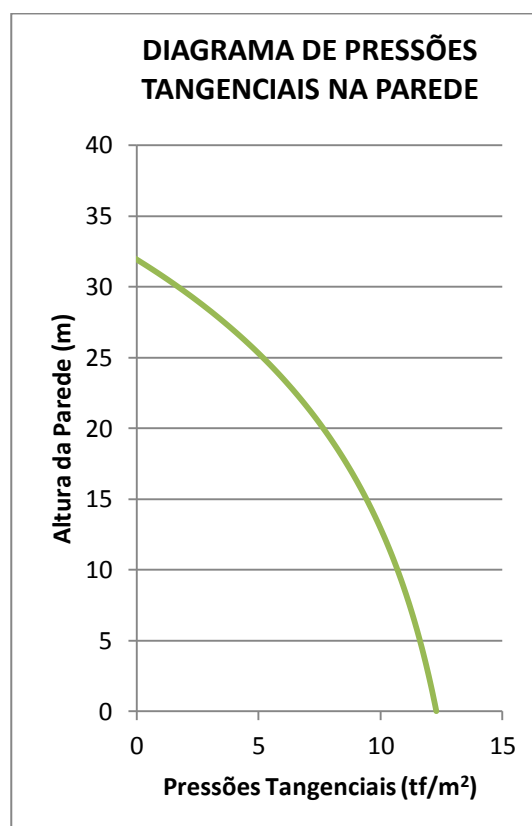
A partir dos esforços horizontais e verticais (tangenciais) na parede do silo, pode-se obter dois gráficos relacionando-os com a altura do mesmo. As figuras 10 e 11 apresentam esses gráficos.

Figura 10 – Pressões horizontais x altura da parede do silo



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 11 – Pressões vertical x altura da parede do silo



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 EFEITO DA TEMPERATURA

A partir da figura 12, pode-se calcular o efeito da temperatura na estrutura do silo.

Onde:

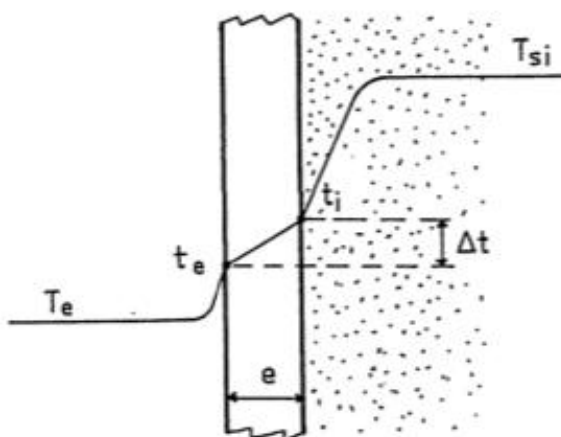
T_e é a temperatura externa ao silo;

T_{si} é a temperatura máxima da massa de clínquer no interior do silo;

e é a espessura da parede;

Δt é a diferença de temperatura, entre o lado externo e interno, da parede do silo.

Figura 12 – Desenho esquemático do efeito da temperatura



(fonte: L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 25)

Para determinação do gradiente térmico utiliza-se a fórmula descrita abaixo (L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 1986, p. 25).

Onde:

t_e é a temperatura de referência e é tomada como 100 °C;

;

;

Considerando a seção integral da parede, calcula-se o momento fletor por unidade de altura, porém não é levado em conta para modelagem no SAP, pois o mesmo calcula os esforços devido a temperatura através do gradiente térmico.

Onde:

α é o coeficiente de dilatação térmica do concreto;

;

E , é o módulo de elasticidade do concreto ou aço;

I é o momento de inércia da parede, na direção que se deseja calcular o momento;

t , é a espessura da parede.

6.3 CARGA DE VENTO

Para o carregamento do vento foi elaborado uma tabela com as forças de arrasto do vento, com auxílio das fórmulas 17 a 19 e determinando áreas de influência para cada altura.

Onde:

V_k é a velocidade característica do vento (m/s);

V_o é a velocidade básica do vento, em Cezarina GO e foi considerada como 35 m/s;

S_1 é o fator que considera as variações de relevo do terreno e vale 1,0;

S_2 é o fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, foi considerado como classe B, categoria III e vale 1,05;

S_3 é o fator que considera o grau de segurança e vida útil requeridos para a estrutura (valor normativo para silos é igual a 0,95);

Com o vento incidindo perpendicularmente ao eixo do silo e com $C_a=0,5$, através do quadro 2, tem-se $C_a=0,5$, pois h/l_1 está entre 1 e 2. Assim, a partir da força de arrasto, chegou-se no momento causado pelo vento na fundação, os resultados podem ser observados na a tabela 4.

Tabela 4 – Pressões de vento

Z [m]	Vk(z) [m/s]	q(z) [Pa]	A [m ²]	F(z) [N]	F(z) [tf]	M(z) [tf.m]
33,5	34,91	747,18	6,25	2334,92	0,23	7,82
33	34,91	747,18	18,75	7004,77	0,70	23,12
32	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	29,89
31	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	28,95
30	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	28,02
29	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	27,09
28	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	26,15
27	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	25,22
26	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	24,28
25	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	23,35
24	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	22,42
23	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	21,48
22	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	20,55
21	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	19,61
20	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	18,68
19	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	17,75
18	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	16,81
17	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	15,88
16	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	14,94
15	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	14,01
14	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	13,08
13	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	12,14

continua

continuação

Z [m]	Vk(z) [m/s]	q(z) [Pa]	A [m ²]	F(z) [N]	F(z) [tf]	M(z) [tf.m]
12	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	11,21
11	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	10,27
10	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	9,34
9	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	8,41
8	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	7,47
7	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	6,54
6	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	5,60
5	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	4,67
4	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	3,74
3	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	2,80
2	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	1,87
1	34,91	747,18	25,00	9339,69	0,93	0,93
0	34,91	747,18	12,50	4669,84	0,47	0,00
				SOMA	31,29	524,07

(fonte: elaborado pelo autor)

6.4 MODELAGEM NO SAP

Com os cálculos dos carregamentos feitos é possível aplicá-los no software (SAP), fazer as combinações necessárias e retirar os esforços para dimensionamento da estrutura. O carregamento devido ao peso próprio do silo é computado pelo programa através do peso específico dado ao material utilizado junto com a espessura dada as paredes do silo.

Para aplicar os carregamentos no SAP, deve-se ter cuidado com o sentido que se aplica a força na estrutura. Se favorável aos eixos do programa no modelo ela é considerada positiva, do contrário negativa. Os sentidos positivos de cada eixo no SAP (F11, F22 , M11, M22) são explicados no manual do programa podendo ser visualizados figuras para melhor compreensão.

7 DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA

Este capítulo trata do cálculo da armadura do silo. Apresentando dimensionamento da armadura da parede do silo e do bloco de fundação. Aborda também os cálculos das perdas da protensão e da força de protensão que atuam na parede para o cálculo da armadura vertical. Para fins de cálculo, dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais é desconsiderado os túneis presentes no silo. Estes foram utilizados somente para determinação das cargas junto ao modelo estrutural.

7.1 CÁLCULO DA ARMADURA HORIZONTAL

Combinando o efeito dos carregamentos (peso próprio, pressão na parede devido ao clínquer armazenado, pressão do vento e efeito da temperatura) no SAP, tem-se os esforços de tração na paredes do silo, com eles gerou-se um gráfico e pode-se determinar as área horizontal de armadura ativa e passiva na parede do silo e a partir disso a força de protensão exercida pela armadura ativa. A figura 13 mostra os esforços de tração nas paredes do silo variando com a altura do mesmo.

A partir dos esforços de tração é possível determinar a área de armadura horizontal na parede do silo. Para tal, a altura da parede foi dividida em 8 trechos. Para o cálculo foi considerado aço CA-50A e cordoalha CP190 com perdas de 20% em t_{∞} .

Onde:

$$\begin{aligned} & ; \\ & ; \\ & ; \\ & ; \end{aligned}$$

A_s é a área de armadura passiva;

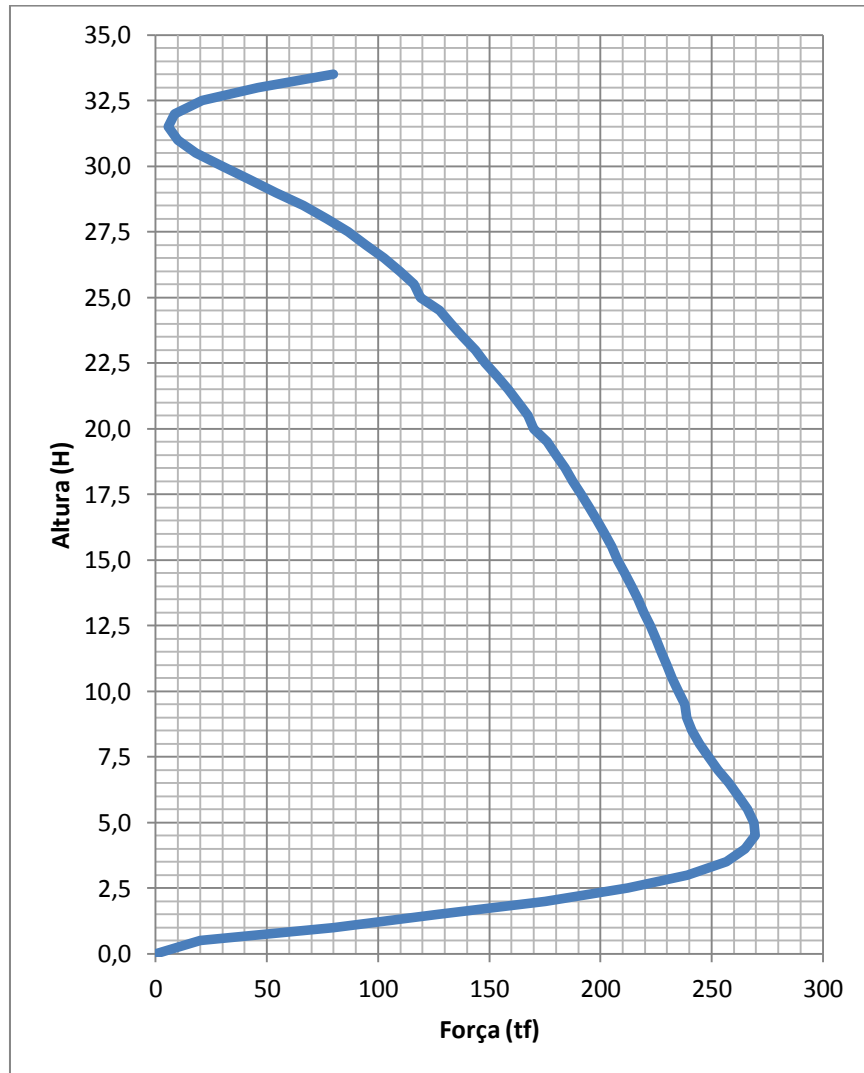
A_p é a área de armadura ativa;

A_c é a área de uma cordoalha;

n é o número de barras CA50A;

n_p é o número de cordoalhas.

Figura 13 – Esforços de tração na parede do silo

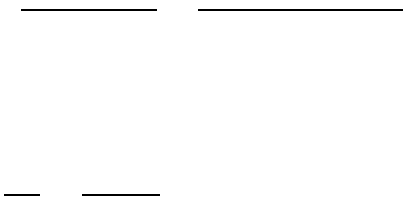


(fonte: elaborado pelo autor)

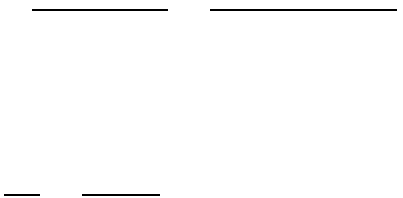
Para o trecho 1, que vai da base da parede até 1m e utilizando armadura passiva de
, tem-se:

Como , a armadura ativa (protensão) utilizada é pequena:

No trecho 2, que varia de 1 m a 12,5 m, utilizando armadura passiva de _____, tem-se:



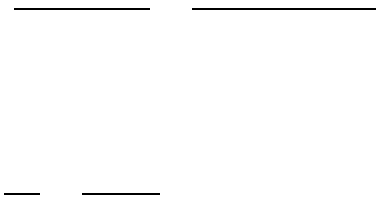
No trecho 3, que varia de 12,5 m a 16 m, utilizando armadura passiva de _____, tem-se:



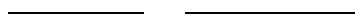
No trecho 4, que varia de 16 m a 20 m, utilizando armadura passiva de _____, tem-se:



No trecho 5, que varia de 20 m a 25 m, utilizando armadura passiva de _____, tem-se:



No trecho 6, que varia de 25 m a 28 m, utilizando armadura passiva de _____, tem-se:



No trecho 7, que varia de 28 m a 30 m, utilizando armadura passiva de _____, tem-se:

Para o trecho 8, que vai da altura de 30 m até o topo da parede, utilizando armadura passiva de _____, tem-se:

Como _____, não é necessário armadura ativa (protensão), mas é utilizado

7.2 PERDAS DA PROTENSÃO

7.2.1 PERDA POR ATRITO

O cálculo para as perdas por atrito, , descrito abaixo, foi feito considerando protensão em uma extremidade, com segmentos curtos dos cabos para diminuir perdas.

Onde:

$$\begin{aligned} & \quad ; \\ & \quad , \text{ considerando cordoalha engraxada;} \\ & \quad ; \\ & \quad (\text{aderência inicial}); \\ \text{---} \quad \text{---} & \quad , \text{ é o comprimento do arco;} \\ & \quad . \end{aligned}$$

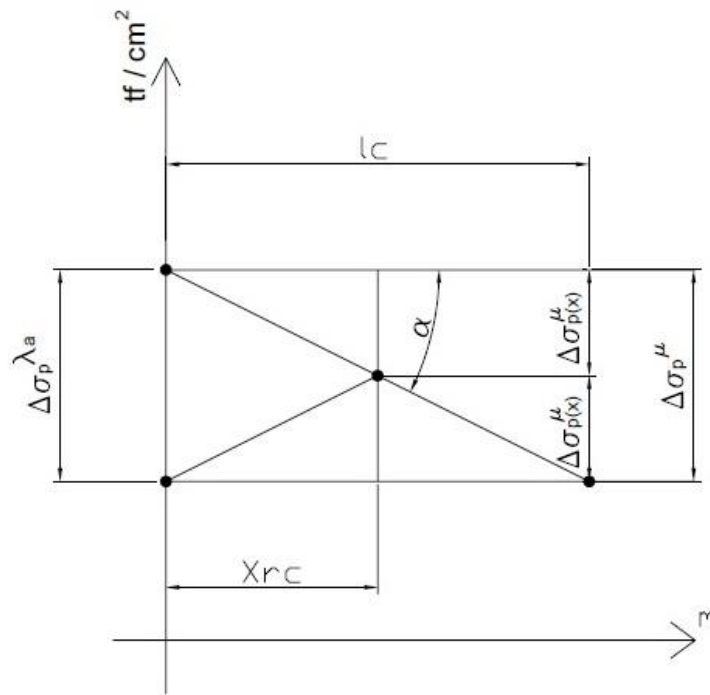
7.2.2 PERDAS POR RECUO DE ANCORAGEM

A perda por recuo de ancoragem, junto com a perda por atrito está descrita abaixo e é representada pela figura 14. Para o cálculo foi considerado repouso no trecho curvo com recuo de ancoragem,

Onde:

$$\begin{aligned} & \quad ; \\ & \quad , \text{ considerando cordoalha engraxada;} \\ & \quad (\text{aderência inicial}); \\ \text{---} \quad \text{---} & \quad , \text{ é o comprimento do arco;} \\ \text{---} \quad \text{---} & \quad ; \\ & \quad ; \\ & \quad ; \end{aligned}$$

Figura 14 – Desenho esquemático da perda por recuo de ancoragem



(fonte: elaborado pelo autor)

7.3 FORÇA DE PROTENSÃO

Com o cálculo das áreas de armadura realizado foi possível verificar as perdas por atrito e por recuo de ancoragem da protensão. Assim pôde-se calcular a força da protensão em cada trecho conforme mostra a tabela 5.

Tabela 5 – Força de protensão

TRECHO	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta\sigma_p^{\lambda a} + 2.\Delta\sigma_p^u$ [tf/cm ²]	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327
σ_p [tf/cm ²]	13,873	13,873	13,873	13,873	13,873	13,873	13,873	13,873
A_p [cm ²]	3,950	22,400	16,800	16,800	11,200	7,900	3,950	3,950
N_{p0} [tf]	54,80	310,75	233,06	233,06	155,37	109,59	54,80	54,80
q_0 [tf/m]	4,31	24,47	18,35	18,35	12,23	8,63	4,31	4,31

(fonte: elaborado pelo autor)

Onde:

A_p é área de armadura ativa em cada trecho;

σ_p , é força de protensão, descontando a perda por atrito e recuo de ancoragem;

q_0 , conforme a figura 10.

Foi considerado que perdeu-se com as perdas progressivas 15% da força de protensão, logo para a aplicação do carregamento devido a força de protensão no SAP, no tempo infinito, foi admitido: .

7.4 ARMADURA NICHOS DE PROTENSÃO

As armadura para os nichos de protensão foram dimensionadas como para um console muito curto, onde a armadura deve resistir a tração provocada pela força de protensão em cada trecho. A tabela 6 mostra a bitola de aço a ser utilizada em cada trecho, considerando que há 6 ramos para cada conjunto de estribo, e seu detalhamento pode ser visto nos anexos.

Onde:

é a força de protensão por metro;

é tensão de escoamento do aço CA-50A;

— é a área de aço por metro;

é a quantidade de conjunto de estribos por metro;

— é a área de aço para um conjunto de estribos;

é a bitola adotada pelo espaçamento.

Tabela 6 – Armadura dos nichos de protensão

TRECHO	1	2	3	4	5	6	7	8
Npo [tf/m]	54,80	310,75	233,06	233,06	155,37	109,59	54,80	54,80
As/m [cm ² /m]	17,64	100,01	75,01	75,01	50,01	35,27	17,64	17,64
n _i	5	9	6	6	5	5	5	5
A _i	0,59	1,85	2,08	2,08	1,67	1,18	0,59	0,59
Ø/cm	Ø 10 c/25	Ø 16 c/12,5	Ø 16 c/20	Ø 16 c/20	Ø 16 c/25	Ø 12,5 c/25	Ø 10 c/25	Ø 10 c/25

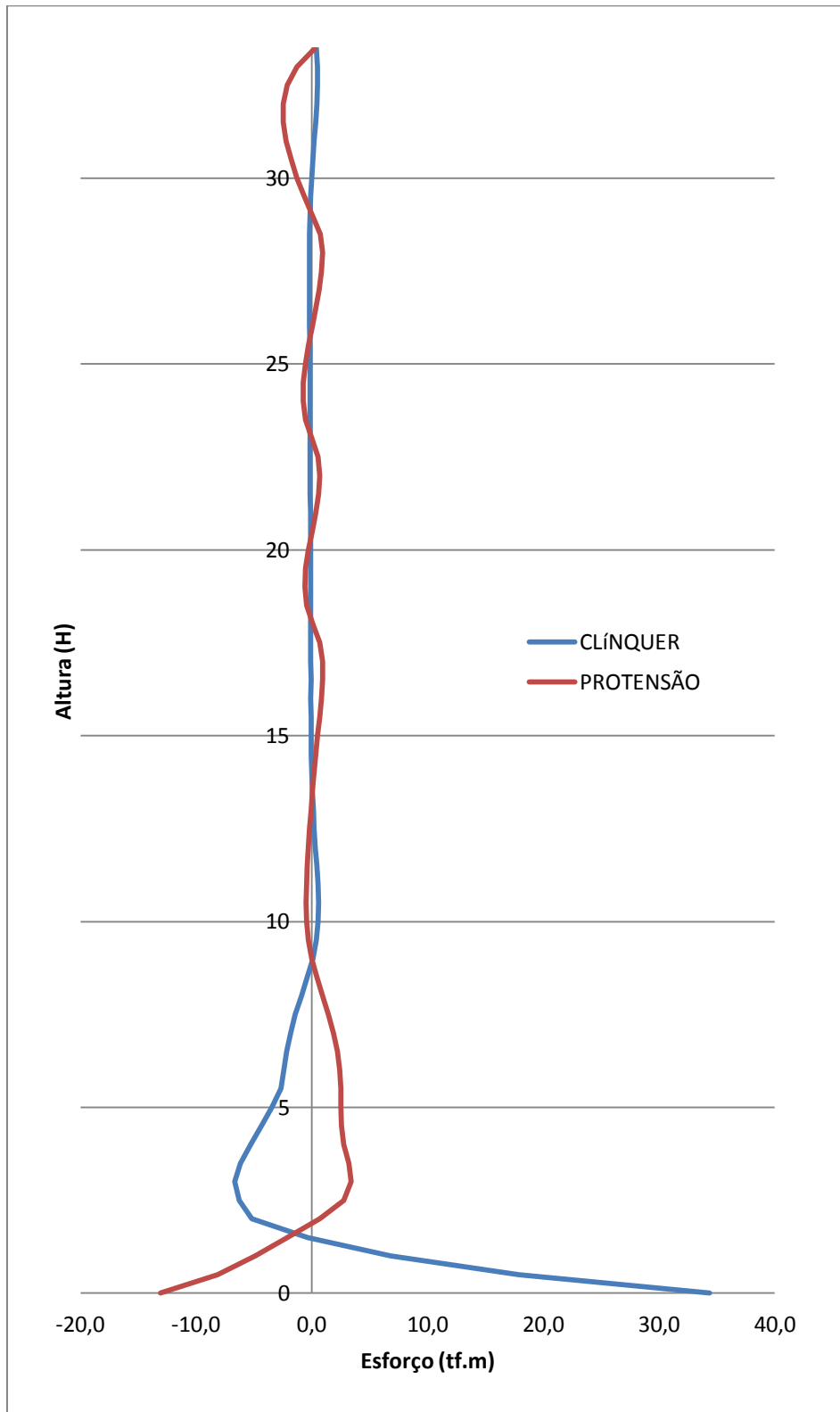
(fonte: elaborado pelo autor)

7.5 ARMADURA VERTICAL

Para o cálculo da armadura vertical da parede do silo foi acrescentada à combinação da armadura horizontal (parcela ativa). O carregamento da força devido a protensão foi inserida no SAP de modo contrário a força de tração provocada pelo clínquer e suportada pela armadura horizontal.

Os esforços utilizados devidos aos carregamentos foram retirados do SAP em 4 locais diferentes (defasados aproximadamente de 90°) para cada altura e as médias destes esforços foram utilizadas para traçar os diagramas com os esforços separados, As tabelas são mostradas do apêndice A. A figura 15 ilustra o diagrama com os esforços de momento verticais causados pelo clínquer e pela protensão na parede do silo

Figura 15 – Diagrama com esforços de momento vertical



(fonte: elaborado pelo autor)

Os coeficientes de ponderações das ações para o estado limite último foram utilizados de acordo com o quadro 3 (com exceção da protensão), ilustrado na a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Quadro 3 – Coeficientes de ponderação da ações (ELU)

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalque de apoio e retração	
	D ¹⁾	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

Onde:
D é desfavorável, F é favorável, G é geral e T é temporária.
¹⁾ Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 46)

A partir das ponderações da norma fez-se as combinações necessárias. As combinações 1 e 2 foram as que apresentaram os maiores esforços e estão descritas a seguir, sendo a carga permanente correspondente ao peso próprio da estrutura de concreto somada a carga da cobertura. As tabelas com esforços devidas a estas combinações podem ser visualizadas no apêndice A.

Onde:

;

A partir das combinações definiu-se os esforços de projeto e assim calculou-se, com o ajuda de ferramenta computacional, a área de aço necessária e verificou-se o momento resistente. Para os cálculos foi considerado flexão composta (flexo-compressão), $f_{ck}=30\text{Mpa}$, $b=100\text{ cm}$,

$h = 40$ cm e $d = 33$ cm. Os resultados se encontram na tabela 6. Verificou-se que a combinação 1 é mais desfavorável no arranque na parede com bloco.

Tabela 7 – Armadura vertical

Altura	COMB1				COMB2				
	F22 (kN)	M22 (kNm)	Mres (kNm)	As (cm ²)	F22 (kN)	M22 (kNm)	Mres (kNm)	As (cm ²)	Ø / cm
33,5	12,23	3,92	124,40	0,13	23,61	24,48	126,07	1,71	16 c/20
33,0	20,30	15,40	125,60	1,00	89,50	16,26	135,81	0	16 c/20
32,5	29,18	25,29	126,90	1,63	153,16	45,31	145,08	1,38	16 c/20
32,0	38,15	29,13	128,23	1,83	210,32	74,18	153,3	3,24	16 c/20
31,5	46,77	28,78	129,50	1,68	262,06	98,41	160,64	5,09	16 c/20
31,0	54,89	25,81	130,70	1,29	304,88	123,96	166,7	7,02	16 c/20
30,5	62,46	20,81	131,80	0,72	342,93	135,53	171,96	7,76	16 c/20
30,0	69,71	15,10	132,90	0,10	377,39	142,77	176,73	7,98	16 c/20
29,5	77,22	7,30	134,00	0,00	409,59	145,19	181,15	7,68	16 c/20
29,0	85,36	0,88	135,20	0,00	440,38	144,50	185,35	7,18	16 c/20
28,5	93,85	9,36	136,45	0,00	470,19	141,28	189,4	6,32	16 c/20
28,0	103,70	11,20	137,90	0,00	500,19	140,94	193,44	5,7	16 c/20
27,5	112,89	10,43	139,23	0,00	529,04	141,24	197,3	5,19	16 c/20
27,0	121,79	7,99	140,53	0,00	556,93	141,98	201	4,86	16 c/20
26,5	130,11	4,60	141,74	0,00	583,81	143,24	204,58	4,54	16 c/20
26,0	138,00	0,79	143,00	0,00	611,04	144,81	208,16	4,31	16 c/20
25,5	145,38	3,02	143,95	0,00	637,37	145,97	211,62	3,98	16 c/20
25,0	152,32	6,23	144,96	0,00	663,37	147,40	215	3,66	16 c/20
24,5	158,90	8,38	145,91	0,00	688,11	148,67	218,2	3,5	16 c/20
24,0	165,48	8,76	146,90	0,00	714,86	148,60	221,66	3	16 c/20
23,5	172,44	6,32	147,86	0,00	740,73	146,89	225	2,26	16 c/20
23,0	180,12	0,25	108,30	0,00	767,08	142,53	191,18	1,35	12,5 c/20

22,5	188,53	6,62	109,60	0,00	793,96	138,29	194,65	0,41	12,5 c/20
22,0	196,78	8,64	110,85	0,00	820,72	136,96	198,08	0	12,5 c/20
21,5	205,36	7,67	112,16	0,00	847,80	137,52	201,5	0	12,5 c/20

continua

continuação

Altura	COMB1				COMB2				
	F22 (kN)	M22 (kNm)	Mres (kNm)	F22 (kN)	M22 (kNm)	Mres (kNm)	F22 (kN)	M22 (kNm)	Ø / cm
21,0	213,52	4,78	113,40	0,00	874,74	139,34	204,88	0	12,5 c/20
20,5	221,16	0,95	114,56	0,00	901,39	141,77	208,2	0	12,5 c/20
20,0	228,13	2,98	115,62	0,00	927,86	144,23	211,44	0	12,5 c/20
19,5	234,68	5,90	116,60	0,00	952,65	146,03	214,45	0	12,5 c/20
19,0	240,85	6,88	117,54	0,00	977,52	146,59	217,43	0	12,5 c/20
18,5	247,08	4,94	118,50	0,00	1005,02	145,32	220,7	0	12,5 c/20
18,0	253,91	1,64	119,51	0,00	1028,65	141,02	223,5	0	12,5 c/20
17,5	261,49	8,42	120,64	0,00	1060,00	136,66	227,11	0	12,5 c/20
17,0	269,52	11,37	121,85	0,00	1088,50	134,66	230,4	0	12,5 c/20
16,5	277,42	11,58	123,03	0,00	1115,58	134,22	233,41	0	12,5 c/20
16,0	286,22	10,54	124,34	0,00	1154,07	135,06	237,7	0	12,5 c/20
15,5	296,10	8,06	125,81	0,00	1187,35	136,77	241,3	0	12,5 c/20
15,0	304,47	5,98	127,00	0,00	1220,81	137,86	244,85	0	12,5 c/20
14,5	311,90	3,93	128,15	0,00	1254,72	138,80	248,4	0	12,5 c/20
14,0	317,47	2,08	128,97	0,00	1288,55	139,46	251,9	0	12,5 c/20
13,5	322,34	0,48	129,70	0,00	1323,65	139,92	255,4	0	12,5 c/20
13,0	326,26	0,92	130,27	0,00	1360,24	139,91	259	0	12,5 c/20
12,5	328,93	2,35	130,66	0,00	1398,48	139,63	262,6	0	12,5 c/20
12,0	330,79	3,57	170,31	0,00	1438,77	138,98	302,86	0	16 c/20
11,5	330,69	4,76	170,17	0,00	1480,53	138,13	306,7	0	16 c/20
11,0	330,46	5,65	170,17	0,00	1522,72	137,38	310,47	0	16 c/20
10,5	329,19	6,16	170,03	0,00	1562,79	136,77	314,03	0	16 c/20

10,0	336,76	5,65	171,00	0,00	1595,06	136,85	316,7	0	16 c/20
9,5	350,57	3,90	162,94	0,00	1625,90	137,86	319,3	0	16 c/20
9,0	382,47	0,24	177,40	0,00	1641,48	139,99	320,51	0	16 c/20

continua

continuação

Altura	COMB1				COMB2				
	F22 (kN)	M22 (kNm)	Mres (kNm)	F22 (kN)	M22 (kNm)	Mres (kNm)	F22 (kN)	M22 (kNm)	Ø / cm
8,5	422,47	4,91	182,99	0,00	1654,19	142,96	321,56	0	16 c/20
8,0	466,28	12,14	188,83	0,00	1663,53	144,74	322,27	0	16 c/20
7,5	505,67	17,85	194,16	0,00	1679,16	147,68	323,53	0	16 c/20
7,0	530,33	23,02	197,43	0,00	1704,26	151,81	325,47	0	16 c/20
6,5	540,77	26,92	198,90	0,00	1742,77	153,94	328,4	0	16 c/20
6,0	531,91	29,20	197,70	0,00	1792,72	153,94	331,88	0	16 c/20
5,5	508,25	29,84	184,98	0,00	1853,46	157,70	335,5	0	16 c/20
5,0	474,43	29,66	189,91	0,00	1906,94	169,53	338,5	0	16 c/20
4,5	449,12	28,26	186,52	0,00	1964,08	184,71	341,45	0	16 c/20
4,0	433,19	31,07	184,35	0,00	1992,50	196,10	342,8	0	16 c/20
3,5	440,24	36,69	185,30	0,00	2019,52	205,03	344,03	0	16 c/20
3,0	452,69	39,12	187,07	0,00	2036,52	210,00	244,78	0	16 c/20
2,5	465,34	31,32	188,69	0,00	2048,87	209,85	345,4	0	16 c/20
2,0	468,77	5,90	189,23	0,00	2062,72	210,33	345,9	0	16 c/20
1,5	460,12	28,62	188,01	0,00	2069,69	164,70	346,2	0	16 c/20
1,0	444,93	61,84	185,80	0,00	2086,11	85,34	346,9	0	16 c/20
0,5	422,36	100,03	182,80	2,37	2119,77	46,82	348,2	0	16 c/20
0,0	417,68	156,52	182,30	10,80	2141,14	243,34	348,9	0	16 c/20

(fonte: elaborado pelo autor)

7.6 BLOCO DE FUNDAÇÃO

Os esforços para o cálculo do bloco de fundação foram retirados do SAP, o modelo foi feito juntamente com as paredes do silo. Logo, aproveitou-se as cargas da parede que descarregam no bloco para o dimensionamento do mesmo. Para tanto, foi necessário encontrar o coeficiente de reação em cada estaca ().

Segundo Velloso e Lopes (2004, p. 129), O coeficiente de reação pode ser estimado a partir de um cálculo do recalque da fundação. Supondo a fundação rígida e submetida a um carregamento vertical igual a soma das cargas verticais. Com o recalque obtido é possível calcular o coeficiente da reação através da fórmula: —.

Onde:

é o coeficiente da reação;

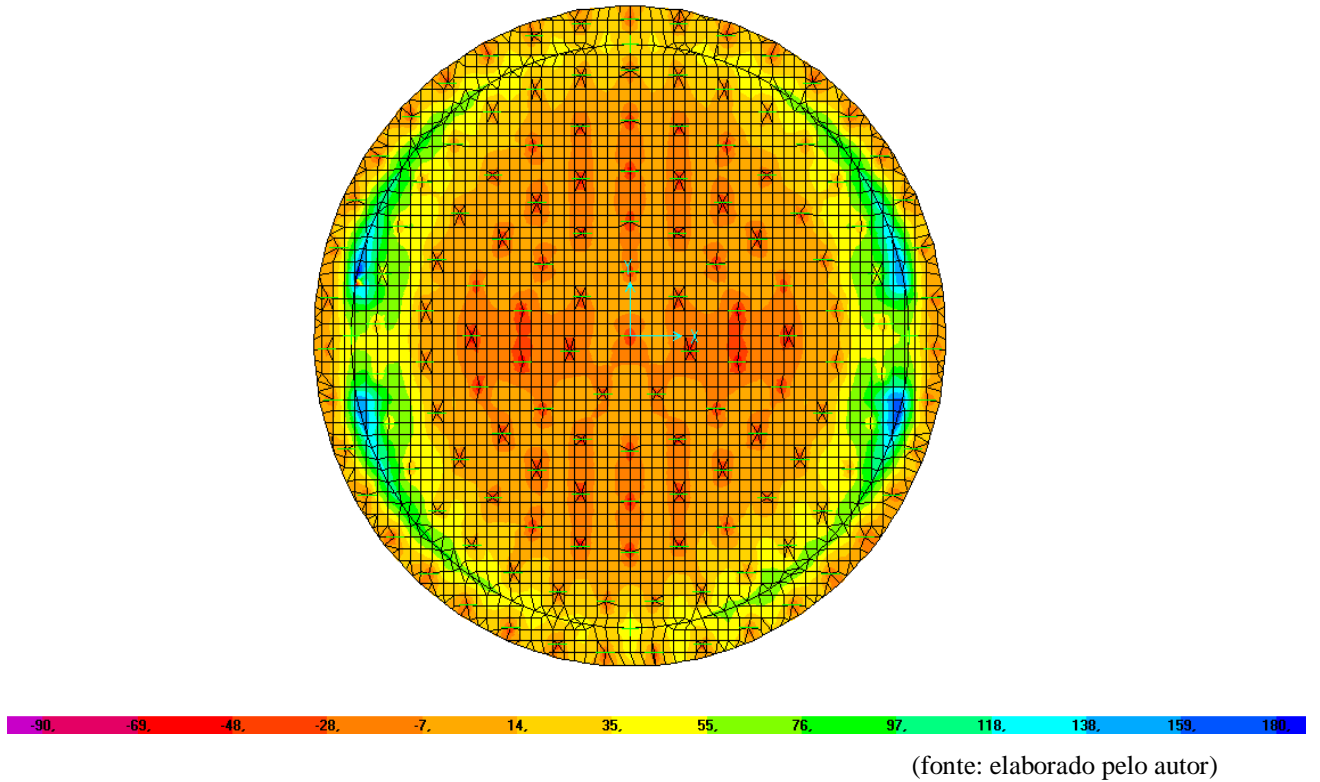
é o carregamento vertical que fundação está submetida;

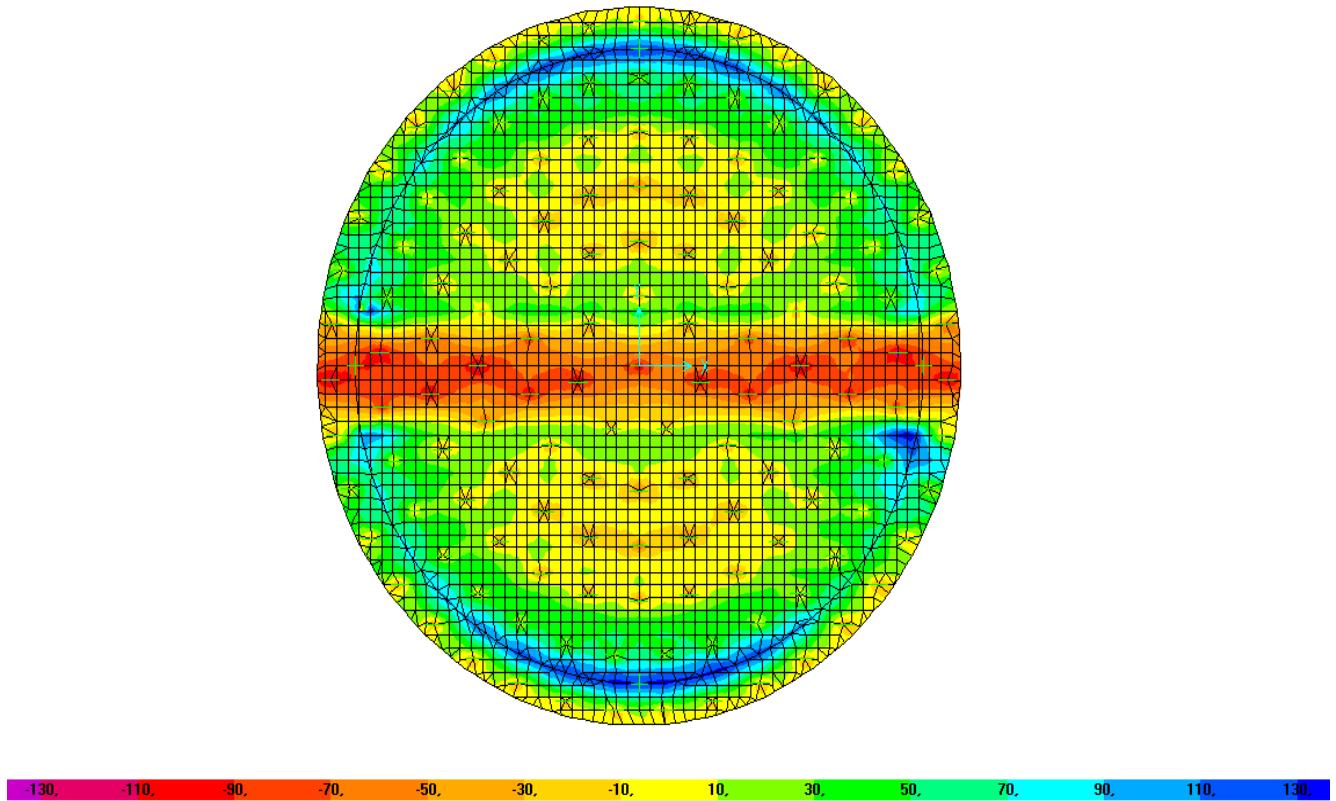
é o recalque.

Para o cálculo do coeficiente de reação foi considerado que a estaca se deforma 4 mm a cada 250 toneladas. Assim, ——— .

A partir do cálculo do coeficiente de reação em cada estaca pode-se dimensionar o bloco, para isso, considerou-se o bloco rígido com altura igual a 1,4 m. Sua rigidez pôde ser comprovada através dos resultados obtidos para o deslocamento vertical no SAP, os quais variaram entre 3,6 e 5,1 mm. O dimensionamento da armadura foi realizado por flexão simples, através dos esforços de momento gerados pelo SAP. Os diagramas com esforços de momento nas duas direções, Myy (momento em torno do eixo y) e Mxx (momento em torno do eixo x), podem ser visualizadas respectivamente nas figuras 16 e 17.

Para o cálculo da armadura no bloco foram considerados os piores esforços de momentos e nos locais onde houve um acréscimo pontual nos esforços foi adicionado armadura. Foi considerado a mesma armadura principal no positivo e negativo da laje, pelo valor dos esforços serem próximos e para evitar erros construtivos. As respectivas bitolas utilizadas conforme o esforço solicitante estão especificadas na tabela 8.

Figura 16 – Esforços de momento M_{yy} Figura 17 – Esforços de momento M_{xx}



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 8 – Armadura do bloco de fundação

	M_{yy}		M_{xx}	
M [tfm/m]	90	180	120	130
M_d [tfm/m]	108	216	144	156
y (cm)	5,43	11,12	7,3	7,93
A_s/m [cm ²]	24,15	46,58	30,58	33,21
n_s/m	4,919	9,487	6,228	6,764
\emptyset / cm	\emptyset 25 c/ 20	\emptyset 25 c/ 10	\emptyset 25 c/ 15	\emptyset 25 c/ 15

(fonte: elaborado pelo autor)

Onde:

M é o esforço característico em tfm/m;

M_d é o esforço de cálculo em tfm/m;

é tensão de escoamento do aço CA-50A utilizada no cálculo;

é a resistência de projeto do concreto com ;

é a largura da seção considerada;

é a altura útil;

_____;

_____ ;

é o número de barras CA-50A por metro.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um aspecto importante para realização deste trabalho foi a possibilidade de aprimorar os conhecimentos na área estrutural da Engenharia Civil. Se tratando, o silo, de uma estrutura particularizada devido a sua geometria aliada a protensão nas paredes de concreto, possibilitou-se o uso de um material amplo para pesquisa. O que gerou um aprofundamento na teoria para por a mesma em prática, a qual, foi agregada com a orientação por parte do professor orientador, de modo a guiar rumo a solução do questionamento analisado e sendo um fator positivo na busca gradativa pelo saber.

Na medida que há pouca bibliografia a cerca de estruturas de silo, torna-se importante este trabalho por abordar as etapas mais importantes que cercam um projeto estrutural. Os cálculos foram realizados utilizando várias obras da literatura sobre o assunto e normas. Em determinados momentos, fez-se uso das experiência de projetistas para sugestões e conselhos.

O uso do programa SAP, beneficiou o trabalho e o aprendizado, uma vez que saiu um pouco da linha do que se aprende nas aulas da graduação e pode-se praticar modelando a estrutura como usualmente é feito por parte dos projetistas hoje em dia. Porém deve-se tomar cuidado e saber o que esperar do software, pois quem não possui experiência e sabe como se comporta a estrutura, pode ser facilmente enganado pelos resultados do programa.

A partir das etapas descritas e executadas no trabalho a cerca do silo com paredes de concreto protendido os objetivos iniciais do trabalho foram alcançados O detalhamento da estrutura, bem como, os detalhes construtivos estão presentes no apêndice B.

REFERÊNCIAS

- ALVES, V. **Análise e dimensionamento de silos de concreto armado**: desenvolvimento de um programa computacional. 2001. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- ANDRADE JUNIOR, L. J. **A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro**. 2002. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- ARCHILLA, A. P. **Projeto estrutural de fábricas de cimento**: silos e moinhos – parte 1. [s.l.], 2010. Disponível em: <http://www.institutodeengenharia.org.br/site/videos/exibe/cod_video/4796/canal/477/Projeto-estrutural-de-fábricas-de-cimento---Silos-e-Moinhos---Parte-1>. Acesso em: 5 abr. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- CALIL, C. J. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. 1990. 198 f. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-4**: Eurocode 1 – actions on structures – part 4: silos and tanks. Brussels, 2006.
- GHALI, A. **Circular storage tanks and silos**. London: E.&F.N Spon, 1979.
- L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS. **Règles professionnelles de conception et de calcul des silos en béton armé ou précontraint**. Montpellier: 1986. Béton 240, n. 446.
- LEONHARDT, F. **Construções de concreto**: concreto protendido. Rio de Janeiro: Interciência, 1983. v. 5.
- MADRONA, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- SAFARIAN, S. S.; HARRIS, E. C. **Design and construction of silos and bunkers**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.
- SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos**. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. v. 1.

**APÊNDICE A – Tabelas com esforços e combinações
para armadura vertical**

Esforços normais e de momento

Altura	Esforços médios de compressão (tf)					Esforços médios do momento vertical (tf.m)				
	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob
33,5	-1,14	0,87	4,49	-1,62	-2,10	0,37	0,28	-0,96	0,04	1,76
33	-2,59	0,82	2,63	-2,15	-3,68	0,46	-1,32	-4,09	0,02	1,53
32,5	-4,04	0,70	1,25	-2,68	-5,36	0,49	-2,14	-7,44	0,02	1,90
32	-5,48	0,57	0,31	-3,21	-6,84	0,42	-2,46	-10,48	0,01	1,91
31,5	-6,89	0,45	-0,38	-3,73	-8,12	0,31	-2,46	-12,99	0,04	1,77
31	-8,29	0,39	-0,57	-4,25	-9,12	0,18	-2,21	-15,55	0,04	1,47
30,5	-9,67	0,36	-0,60	-4,77	-9,90	0,06	-1,79	-16,55	0,04	1,13
30	-11,03	0,35	-0,55	-5,28	-10,52	-0,04	-1,31	-17,12	0,04	0,79
29,5	-12,37	0,32	-0,46	-5,79	-11,00	-0,11	-0,66	-17,40	0,04	0,50
29	-13,71	0,23	-0,35	-6,30	-11,37	-0,16	0,03	-17,47	0,04	0,27
28,5	-15,04	0,13	-0,25	-6,81	-11,66	-0,19	0,75	-17,41	0,04	0,10
28	-16,37	-0,10	-0,17	-7,32	-11,89	-0,20	0,90	-17,29	0,04	-0,02
27,5	-17,70	-0,28	-0,11	-7,83	-12,05	-0,21	0,84	-17,15	0,04	-0,09
27	-19,02	-0,42	-0,06	-8,34	-12,16	-0,21	0,63	-17,01	0,04	-0,11
26,5	-20,35	-0,53	0,01	-8,85	-12,23	-0,20	0,35	-16,90	0,04	-0,12
26	-21,67	-0,59	-0,01	-9,36	-12,29	-0,19	0,03	-16,82	0,04	-0,11
25,5	-23,00	-0,61	-0,01	-9,87	-12,33	-0,18	-0,30	-16,75	0,04	-0,08
25	-24,32	-0,58	-0,01	-10,39	-12,36	-0,17	-0,57	-16,72	0,04	-0,06
24,5	-25,58	-0,54	-0,01	-10,90	-12,38	-0,17	-0,75	-16,72	0,04	-0,05
24	-26,99	-0,48	-0,01	-11,41	-12,40	-0,16	-0,78	-16,72	0,04	-0,04
23,5	-28,32	-0,47	-0,02	-11,92	-12,41	-0,15	-0,57	-16,72	0,04	-0,03
23	-29,65	-0,51	-0,02	-12,43	-12,42	-0,15	-0,02	-16,72	0,04	-0,03
22,5	-30,99	-0,63	-0,01	-12,94	-12,44	-0,14	0,52	-16,72	0,04	-0,02
22	-32,34	-0,73	-0,02	-13,44	-12,44	-0,14	0,69	-16,72	0,04	-0,02
21,5	-33,69	-0,86	-0,01	-13,94	-12,45	-0,14	0,60	-16,72	0,04	-0,02

continua

continuação

Altura	Esforços médios de compressão (tf)					Esforços médios do momento vertical (tf.m)				
	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob
21	-35,06	-0,96	-0,01	-14,44	-12,46	-0,14	0,36	-16,72	0,04	-0,02
20,5	-36,42	-1,00	0,00	-14,95	-12,47	-0,13	0,03	-16,72	0,04	-0,02
20	-37,81	-1,00	0,01	-15,45	-12,49	-0,13	-0,30	-16,72	0,04	-0,02
19,5	-39,09	-0,95	0,02	-15,96	-12,50	-0,12	-0,54	-16,72	0,04	-0,02
19	-40,39	-0,88	0,03	-16,46	-12,52	-0,12	-0,63	-16,72	0,04	-0,02
18,5	-41,88	-0,81	0,04	-16,96	-12,54	-0,12	-0,46	-16,72	0,04	-0,02
18	-43,06	-0,79	0,05	-17,47	-12,56	-0,11	0,09	-16,72	0,05	-0,02
17,5	-44,75	-0,83	0,07	-17,97	-12,58	-0,11	0,66	-16,72	0,05	-0,02
17	-46,22	-0,91	0,09	-18,48	-12,61	-0,11	0,90	-16,72	0,05	-0,02
16,5	-47,58	-0,98	0,11	-18,99	-12,65	-0,08	0,92	-16,72	0,05	-0,02
16	-49,68	-1,02	0,13	-19,58	-12,70	-0,10	0,83	-16,72	0,05	-0,02
15,5	-51,34	-1,12	0,15	-20,20	-12,75	-0,09	0,68	-16,72	0,00	-0,02
15	-53,07	-1,06	0,18	-20,85	-12,81	-0,07	0,50	-16,72	0,00	-0,02
14,5	-54,87	-0,96	0,21	-21,47	-12,89	-0,04	0,33	-16,72	0,00	-0,02
14	-56,77	-0,79	0,24	-22,01	-12,98	-0,01	0,18	-16,72	0,00	-0,02
13,5	-58,78	-0,57	0,28	-22,54	-13,08	0,05	0,04	-16,74	0,00	-0,02
13	-60,92	-0,27	0,31	-23,08	-13,21	0,11	-0,08	-16,74	0,00	-0,02
12,5	-63,23	0,12	0,35	-23,60	-13,34	0,20	-0,20	-16,74	0,00	-0,02
12	-65,69	0,58	0,37	-24,13	-13,50	0,30	-0,30	-16,74	0,00	-0,02
11,5	-68,34	1,19	0,38	-24,63	-13,66	0,42	-0,40	-16,74	0,00	-0,02
11	-71,01	1,81	0,37	-25,15	-13,82	0,51	-0,48	-16,74	0,00	-0,02
10,5	-73,60	2,49	0,29	-25,63	-13,93	0,58	-0,52	-16,74	0,00	-0,02
10	-75,24	2,43	0,18	-26,12	-14,01	0,55	-0,48	-16,74	0,00	-0,02
9,5	-76,55	1,81	0,01	-26,58	-14,00	0,40	-0,33	-16,74	0,00	-0,02
9	-75,91	-0,32	-0,20	-27,05	-14,00	0,07	-0,02	-16,73	0,00	-0,02

continua

continuação

Altura	Esforços médios de compressão (tf)					Esforços médios do momento vertical (tf.m)				
	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob
8,5	-74,71	-3,19	-0,36	-27,47	-14,03	-0,40	0,41	-16,70	0,00	-0,02
8	-73,09	-6,35	-0,50	-27,91	-14,06	-0,92	0,92	-16,64	0,09	-0,02
7,5	-72,18	-9,21	-0,58	-28,30	-14,09	-1,43	1,42	-16,58	0,07	-0,02
7	-72,64	-10,78	-0,61	-28,72	-14,12	-1,84	1,85	-16,77	0,07	-0,02
6,5	-74,77	-11,24	-0,59	-29,07	-14,15	-2,18	2,20	-16,75	0,06	-0,02
6	-78,58	-10,01	-0,55	-29,49	-14,19	-2,41	2,41	-16,52	0,04	-0,03
5,5	-83,93	-7,63	-0,43	-29,82	-14,21	-2,67	2,51	-16,57	0,00	-0,03
5	-89,19	-4,30	-0,32	-30,24	-14,25	-3,44	2,51	-16,66	-0,02	-0,03
4,5	-94,43	-1,68	-0,02	-30,65	-14,28	-4,36	2,53	-16,75	-0,13	-0,04
4	-97,13	0,22	0,22	-31,13	-14,32	-5,27	2,74	-16,80	-0,11	-0,05
3,5	-98,73	0,17	0,54	-31,59	-14,35	-6,17	3,18	-16,79	-0,08	-0,06
3	-99,22	-0,32	0,64	-32,07	-14,39	-6,66	3,37	-16,73	-0,07	-0,08
2,5	-99,33	-0,83	0,65	-32,54	-14,42	-6,30	2,77	-16,65	-0,12	-0,10
2	-100,00	-0,56	0,51	-33,01	-14,34	-5,18	0,69	-16,57	-0,17	-0,12
1,5	-100,99	0,71	0,26	-33,47	-13,93	-0,37	-2,14	-16,48	-0,23	-0,12
1	-102,92	2,52	-0,04	-33,93	-13,53	6,79	-4,90	-16,40	-0,25	-0,12
0,5	-106,34	4,93	-0,46	-34,36	-13,13	17,89	-8,17	-16,35	-0,21	-0,07
0	-107,79	5,91	-0,28	-34,86	-13,36	34,35	-13,08	-16,30	-0,06	0,03

(fonte: elaborado pelo autor)

Combinções das ações e soma ponderada-F22

Altura	COMB 1						COMB 2					
	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma
33,5	0,0	1,0	0,0	-2,3	0,0	-1,2	-1,6	0,7	3,8	-2,3	-2,9	-2,4
33	0,0	1,0	0,0	-3,0	0,0	-2,0	-3,6	0,6	2,2	-3,0	-5,2	-8,9
32,5	0,0	0,8	0,0	-3,7	0,0	-2,9	-5,7	0,5	1,1	-3,7	-7,5	-15,3
32	0,0	0,7	0,0	-4,5	0,0	-3,8	-7,7	0,4	0,3	-4,5	-9,6	-21,0
31,5	0,0	0,5	0,0	-5,2	0,0	-4,7	-9,6	0,3	-0,3	-5,2	-11,4	-26,2
31	0,0	0,5	0,0	-6,0	0,0	-5,5	-11,6	0,3	-0,5	-6,0	-12,8	-30,5
30,5	0,0	0,4	0,0	-6,7	0,0	-6,2	-13,5	0,3	-0,5	-6,7	-13,9	-34,3
30	0,0	0,4	0,0	-7,4	0,0	-7,0	-15,4	0,3	-0,5	-7,4	-14,7	-37,7
29,5	0,0	0,4	0,0	-8,1	0,0	-7,7	-17,3	0,2	-0,4	-8,1	-15,4	-41,0
29	0,0	0,3	0,0	-8,8	0,0	-8,5	-19,2	0,2	-0,3	-8,8	-15,9	-44,0
28,5	0,0	0,1	0,0	-9,5	0,0	-9,4	-21,1	0,1	-0,2	-9,5	-16,3	-47,0
28	0,0	-0,1	0,0	-10,2	0,0	-10,4	-22,9	-0,1	-0,1	-10,2	-16,6	-50,0
27,5	0,0	-0,3	0,0	-11,0	0,0	-11,3	-24,8	-0,2	-0,1	-11,0	-16,9	-52,9
27	0,0	-0,5	0,0	-11,7	0,0	-12,2	-26,6	-0,3	-0,1	-11,7	-17,0	-55,7
26,5	0,0	-0,6	0,0	-12,4	0,0	-13,0	-28,5	-0,4	0,0	-12,4	-17,1	-58,4
26	0,0	-0,7	0,0	-13,1	0,0	-13,8	-30,3	-0,4	0,0	-13,1	-17,2	-61,1
25,5	0,0	-0,7	0,0	-13,8	0,0	-14,5	-32,2	-0,5	0,0	-13,8	-17,3	-63,7
25	0,0	-0,7	0,0	-14,5	0,0	-15,2	-34,1	-0,4	0,0	-14,5	-17,3	-66,3
24,5	0,0	-0,6	0,0	-15,3	0,0	-15,9	-35,8	-0,4	0,0	-15,3	-17,3	-68,8
24	0,0	-0,6	0,0	-16,0	0,0	-16,5	-37,8	-0,4	0,0	-16,0	-17,4	-71,5
23,5	0,0	-0,6	0,0	-16,7	0,0	-17,2	-39,6	-0,4	0,0	-16,7	-17,4	-74,1
23	0,0	-0,6	0,0	-17,4	0,0	-18,0	-41,5	-0,4	0,0	-17,4	-17,4	-76,7
22,5	0,0	-0,7	0,0	-18,1	0,0	-18,9	-43,4	-0,5	0,0	-18,1	-17,4	-79,4
22	0,0	-0,9	0,0	-18,8	0,0	-19,7	-45,3	-0,6	0,0	-18,8	-17,4	-82,1
21,5	0,0	-1,0	0,0	-19,5	0,0	-20,5	-47,2	-0,7	0,0	-19,5	-17,4	-84,8

continua

continuação

Altura	COMB 1						COMB 2					
	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma
21	0,0	-1,1	0,0	-20,2	0,0	-21,4	-49,1	-0,7	0,0	-20,2	-17,4	-87,5
20,5	0,0	-1,2	0,0	-20,9	0,0	-22,1	-51,0	-0,8	0,0	-20,9	-17,5	-90,1
20	0,0	-1,2	0,0	-21,6	0,0	-22,8	-52,9	-0,8	0,0	-21,6	-17,5	-92,8
19,5	0,0	-1,1	0,0	-22,3	0,0	-23,5	-54,7	-0,7	0,0	-22,3	-17,5	-95,3
19	0,0	-1,0	0,0	-23,0	0,0	-24,1	-56,5	-0,7	0,0	-23,0	-17,5	-97,8
18,5	0,0	-1,0	0,0	-23,7	0,0	-24,7	-58,6	-0,6	0,0	-23,7	-17,5	-100,5
18	0,0	-0,9	0,0	-24,5	0,0	-25,4	-60,3	-0,6	0,0	-24,5	-17,6	-102,9
17,5	0,0	-1,0	0,0	-25,2	0,0	-26,1	-62,7	-0,6	0,1	-25,2	-17,6	-106,0
17	0,0	-1,1	0,0	-25,9	0,0	-27,0	-64,7	-0,7	0,1	-25,9	-17,7	-108,8
16,5	0,0	-1,2	0,0	-26,6	0,0	-27,7	-66,6	-0,7	0,1	-26,6	-17,7	-111,6
16	0,0	-1,2	0,0	-27,4	0,0	-28,6	-69,6	-0,8	0,1	-27,4	-17,8	-115,4
15,5	0,0	-1,3	0,0	-28,3	0,0	-29,6	-71,9	-0,9	0,1	-28,3	-17,9	-118,7
15	0,0	-1,3	0,0	-29,2	0,0	-30,4	-74,3	-0,8	0,1	-29,2	-17,9	-122,1
14,5	0,0	-1,1	0,0	-30,1	0,0	-31,2	-76,8	-0,7	0,2	-30,1	-18,0	-125,5
14	0,0	-0,9	0,0	-30,8	0,0	-31,7	-79,5	-0,6	0,2	-30,8	-18,2	-128,9
13,5	0,0	-0,7	0,0	-31,6	0,0	-32,2	-82,3	-0,4	0,2	-31,6	-18,3	-132,4
13	0,0	-0,3	0,0	-32,3	0,0	-32,6	-85,3	-0,2	0,3	-32,3	-18,5	-136,0
12,5	0,0	0,1	0,0	-33,0	0,0	-32,9	-88,5	0,1	0,3	-33,0	-18,7	-139,8
12	0,0	0,7	0,0	-33,8	0,0	-33,1	-92,0	0,4	0,3	-33,8	-18,9	-143,9
11,5	0,0	1,4	0,0	-34,5	0,0	-33,1	-95,7	0,9	0,3	-34,5	-19,1	-148,1
11	0,0	2,2	0,0	-35,2	0,0	-33,0	-99,4	1,4	0,3	-35,2	-19,3	-152,3
10,5	0,0	3,0	0,0	-35,9	0,0	-32,9	-103,0	1,9	0,2	-35,9	-19,5	-156,3
10	0,0	2,9	0,0	-36,6	0,0	-33,7	-105,3	1,9	0,1	-36,6	-19,6	-159,5
9,5	0,0	2,1	0,0	-37,2	0,0	-35,1	-107,2	1,4	0,0	-37,2	-19,6	-162,6
9	0,0	-0,4	0,0	-37,9	0,0	-38,2	-106,3	-0,2	-0,2	-37,9	-19,6	-164,1

continua

continuação

Altura	COMB 1						COMB 2					
	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma
8,5	0,0	-3,8	0,0	-38,5	0,0	-42,2	-104,6	-2,4	-0,3	-38,5	-19,6	-165,4
8	0,0	-7,6	0,0	-39,1	0,0	-46,6	-102,3	-4,9	-0,4	-39,1	-19,7	-166,4
7,5	0,0	-11,0	0,0	-39,6	0,0	-50,6	-101,1	-7,0	-0,5	-39,6	-19,7	-167,9
7	0,0	-12,8	0,0	-40,2	0,0	-53,0	-101,7	-8,2	-0,5	-40,2	-19,8	-170,4
6,5	0,0	-13,4	0,0	-40,7	0,0	-54,1	-104,7	-8,6	-0,5	-40,7	-19,8	-174,3
6	0,0	-11,9	0,0	-41,3	0,0	-53,2	-110,0	-7,7	-0,5	-41,3	-19,9	-179,3
5,5	0,0	-9,1	0,0	-41,7	0,0	-50,8	-117,5	-5,8	-0,4	-41,7	-19,9	-185,3
5	0,0	-5,1	0,0	-42,3	0,0	-47,4	-124,9	-3,3	-0,3	-42,3	-20,0	-190,7
4,5	0,0	-2,0	0,0	-42,9	0,0	-44,9	-132,2	-1,3	0,0	-42,9	-20,0	-196,4
4	0,0	0,3	0,0	-43,6	0,0	-43,3	-136,0	0,2	0,2	-43,6	-20,0	-199,3
3,5	0,0	0,2	0,0	-44,2	0,0	-44,0	-138,2	0,1	0,4	-44,2	-20,1	-202,0
3	0,0	-0,4	0,0	-44,9	0,0	-45,3	-138,9	-0,2	0,5	-44,9	-20,1	-203,7
2,5	0,0	-1,0	0,0	-45,5	0,0	-46,5	-139,1	-0,6	0,5	-45,5	-20,2	-204,9
2	0,0	-0,7	0,0	-46,2	0,0	-46,9	-140,0	-0,4	0,4	-46,2	-20,1	-206,3
1,5	0,0	0,8	0,0	-46,9	0,0	-46,0	-141,4	0,5	0,2	-46,9	-19,5	-207,0
1	0,0	3,0	0,0	-47,5	0,0	-44,5	-144,1	1,9	0,0	-47,5	-18,9	-208,6
0,5	0,0	5,9	0,0	-48,1	0,0	-42,2	-148,9	3,8	-0,4	-48,1	-18,4	-212,0
0	0,0	7,0	0,0	-48,8	0,0	-41,8	-150,9	4,5	-0,2	-48,8	-18,7	-214,1

(fonte: elaborado pelo autor)

Combinções das ações e soma ponderada-M22

Altura	COMB 1						COMB 2					
	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma
33,5	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	0,4	0,5	0,2	-0,8	0,1	2,5	2,4
33,0	0,0	-1,6	0,0	0,0	0,0	-1,5	0,6	-1,0	-3,4	0,0	2,1	-1,6
32,5	0,0	-2,5	0,0	0,0	0,0	-2,5	0,7	-1,6	-6,2	0,0	2,7	-4,5
32,0	0,0	-2,9	0,0	0,0	0,0	-2,9	0,6	-1,9	-8,8	0,0	2,7	-7,4
31,5	0,0	-2,9	0,0	0,0	0,0	-2,9	0,4	-1,9	-10,9	0,0	2,5	-9,8
31,0	0,0	-2,6	0,0	0,0	0,0	-2,6	0,3	-1,7	-13,1	0,0	2,1	-12,4
30,5	0,0	-2,1	0,0	0,0	0,0	-2,1	0,1	-1,4	-13,9	0,0	1,6	-13,6
30,0	0,0	-1,6	0,0	0,0	0,0	-1,5	0,0	-1,0	-14,4	0,0	1,1	-14,3
29,5	0,0	-0,8	0,0	0,0	0,0	-0,7	-0,2	-0,5	-14,6	0,0	0,7	-14,5
29,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,2	0,0	-14,7	0,0	0,4	-14,5
28,5	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,9	-0,3	0,6	-14,6	0,0	0,1	-14,1
28,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	1,1	-0,3	0,7	-14,5	0,0	0,0	-14,1
27,5	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	-0,3	0,6	-14,4	0,0	-0,1	-14,1
27,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,8	-0,3	0,5	-14,3	0,0	-0,2	-14,2
26,5	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,5	-0,3	0,3	-14,2	0,0	-0,2	-14,3
26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,3	0,0	-14,1	0,0	-0,2	-14,5
25,5	0,0	-0,4	0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,2	-0,2	-14,1	0,0	-0,1	-14,6
25,0	0,0	-0,7	0,0	0,0	0,0	-0,6	-0,2	-0,4	-14,0	0,0	-0,1	-14,7
24,5	0,0	-0,9	0,0	0,0	0,0	-0,8	-0,2	-0,6	-14,0	0,0	-0,1	-14,9
24,0	0,0	-0,9	0,0	0,0	0,0	-0,9	-0,2	-0,6	-14,0	0,0	0,0	-14,9
23,5	0,0	-0,7	0,0	0,0	0,0	-0,6	-0,2	-0,4	-14,0	0,0	0,0	-14,7
23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,0	-14,0	0,0	0,0	-14,3
22,5	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,7	-0,2	0,4	-14,0	0,0	0,0	-13,8
22,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,9	-0,2	0,5	-14,0	0,0	0,0	-13,7
21,5	0,0	0,7	0,0	0,1	0,0	0,8	-0,2	0,5	-14,0	0,1	0,0	-13,8

continua

continuação

Altura	COMB 1						COMB 2					
	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma
21,0	0,0	0,4	0,0	0,1	0,0	0,5	-0,2	0,3	-14,0	0,1	0,0	-13,9
20,5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	-0,2	0,0	-14,0	0,1	0,0	-14,2
20,0	0,0	-0,4	0,0	0,1	0,0	-0,3	-0,2	-0,2	-14,0	0,1	0,0	-14,4
19,5	0,0	-0,6	0,0	0,1	0,0	-0,6	-0,2	-0,4	-14,0	0,1	0,0	-14,6
19,0	0,0	-0,7	0,0	0,1	0,0	-0,7	-0,2	-0,5	-14,0	0,1	0,0	-14,7
18,5	0,0	-0,6	0,0	0,1	0,0	-0,5	-0,2	-0,4	-14,0	0,1	0,0	-14,5
18,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	-0,2	0,1	-14,0	0,1	0,0	-14,1
17,5	0,0	0,8	0,0	0,1	0,0	0,8	-0,2	0,5	-14,0	0,1	0,0	-13,7
17,0	0,0	1,1	0,0	0,1	0,0	1,1	-0,1	0,7	-14,0	0,1	0,0	-13,5
16,5	0,0	1,1	0,0	0,1	0,0	1,2	-0,1	0,7	-14,0	0,1	0,0	-13,4
16,0	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0	1,1	-0,1	0,6	-14,0	0,1	0,0	-13,5
15,5	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,8	-0,1	0,5	-14,0	0,0	0,0	-13,7
15,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,6	-0,1	0,4	-14,0	0,0	0,0	-13,8
14,5	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,3	-14,0	0,0	0,0	-13,9
14,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	-14,0	0,0	0,0	-13,9
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	-14,1	0,0	0,0	-14,0
13,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,2	-0,1	-14,1	0,0	0,0	-14,0
12,5	0,0	-0,2	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,3	-0,2	-14,1	0,0	0,0	-14,0
12,0	0,0	-0,4	0,0	0,0	0,0	-0,4	0,4	-0,2	-14,1	0,0	0,0	-13,9
11,5	0,0	-0,5	0,0	0,0	0,0	-0,5	0,6	-0,3	-14,1	0,0	0,0	-13,8
11,0	0,0	-0,6	0,0	0,0	0,0	-0,6	0,7	-0,4	-14,1	0,0	0,0	-13,7
10,5	0,0	-0,6	0,0	0,0	0,0	-0,6	0,8	-0,4	-14,1	0,0	0,0	-13,7
10,0	0,0	-0,6	0,0	0,0	0,0	-0,6	0,8	-0,4	-14,1	0,0	0,0	-13,7
9,5	0,0	-0,4	0,0	0,0	0,0	-0,4	0,6	-0,3	-14,1	0,0	0,0	-13,8
9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	-14,1	0,0	0,0	-14,0

continua

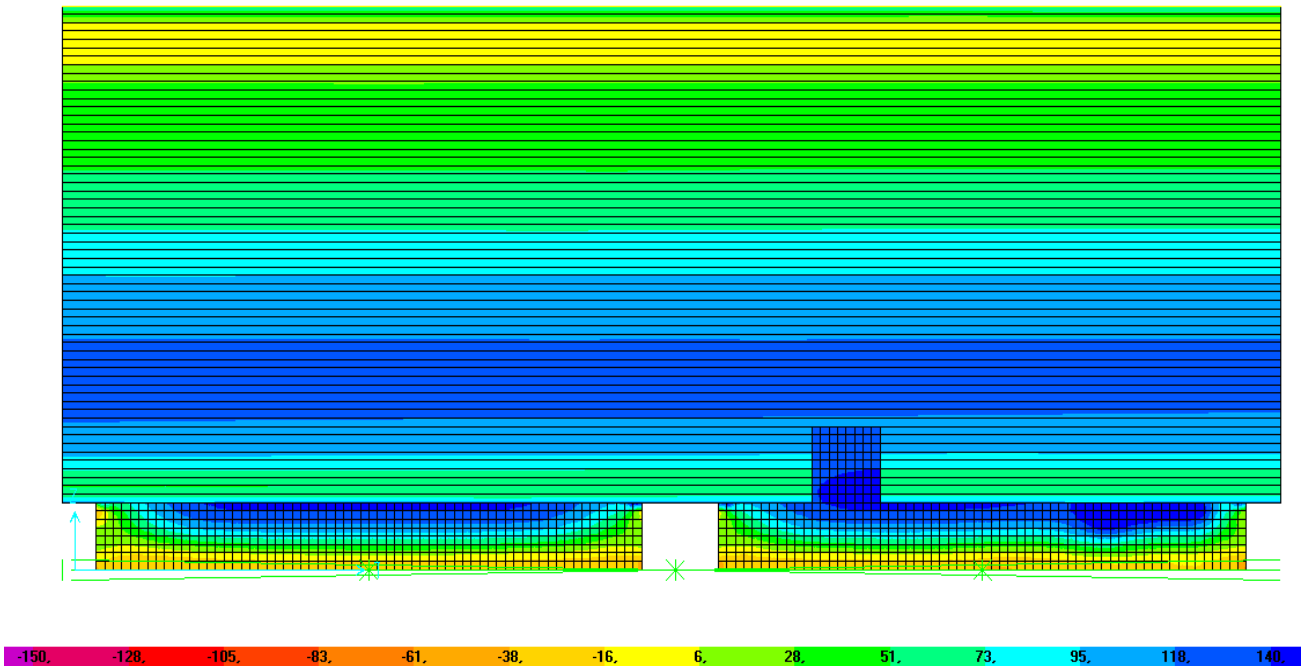
continuação

Altura	COMB 1						COMB 2					
	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma	Clínq	Prot	Temp	Peso P.	Cob	Soma
8,5	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	-0,6	0,3	-14,0	0,0	0,0	-14,3
8,0	0,0	1,1	0,0	0,1	0,0	1,2	-1,3	0,7	-14,0	0,1	0,0	-14,5
7,5	0,0	1,7	0,0	0,1	0,0	1,8	-2,0	1,1	-13,9	0,1	0,0	-14,8
7,0	0,0	2,2	0,0	0,1	0,0	2,3	-2,6	1,4	-14,1	0,1	0,0	-15,2
6,5	0,0	2,6	0,0	0,1	0,0	2,7	-3,1	1,7	-14,1	0,1	0,0	-15,4
6,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	2,9	-3,4	1,8	-13,9	0,0	0,0	-15,4
5,5	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	3,0	-3,7	1,9	-13,9	0,0	0,0	-15,8
5,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	3,0	-4,8	1,9	-14,0	0,0	0,0	-17,0
4,5	0,0	3,0	0,0	-0,2	0,0	2,8	-6,1	1,9	-14,1	-0,2	-0,1	-18,5
4,0	0,0	3,3	0,0	-0,2	0,0	3,1	-7,4	2,1	-14,1	-0,2	-0,1	-19,6
3,5	0,0	3,8	0,0	-0,1	0,0	3,7	-8,6	2,4	-14,1	-0,1	-0,1	-20,5
3,0	0,0	4,0	0,0	-0,1	0,0	3,9	-9,3	2,6	-14,1	-0,1	-0,1	-21,0
2,5	0,0	3,3	0,0	-0,2	0,0	3,1	-8,8	2,1	-14,0	-0,2	-0,1	-21,0
2,0	0,0	0,8	0,0	-0,2	0,0	0,6	-7,2	0,5	-13,9	-0,2	-0,2	-21,0
1,5	0,0	-2,5	0,0	-0,3	0,0	-2,9	-0,5	-1,6	-13,8	-0,3	-0,2	-16,5
1,0	0,0	-5,8	0,0	-0,4	0,0	-6,2	9,5	-3,8	-13,8	-0,4	-0,2	-8,5
0,5	0,0	-9,7	0,0	-0,3	0,0	-10,0	25,0	-6,2	-13,7	-0,3	-0,1	4,7
0,0	0,0	-15,6	0,0	-0,1	0,0	-15,7	48,1	-10,0	-13,7	-0,1	0,0	24,3

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE B – Figura com esforços horizontais na parede do silo

Esforços horizontais F11 (tração)



(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE C – Detalhamento estrutural do silo